



**Carlos Francisco Meneses
Fernandes Faria da Rosa**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Caracterização de alvenarias de pedra antigas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques,
Professor Catedrático, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Profª Doutora Maria Paulina Santos Forte Faria Rodrigues
Arguente: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho
Vogal: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2013

‘Copyright’ Carlos Francisco Meneses Fernandes Faria da Rosa, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Este espaço pretende lembrar todos aqueles que de forma directa ou indirecta contribuíram para a concretização da presente dissertação, aos quais devo um profundo e sincero agradecimento pela ajuda e apoio.

Primeiramente gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando M. A. Henriques por se ter disponibilizado para ser orientador científico deste trabalho e também todos os ensinamentos transmitidos durante o curso.

Gostaria também de fazer um agradecimento especial ao Engenheiro Fernando Jorne por toda a ajuda fornecida durante o trabalho, esclarecimentos, chamadas de atenção e partilha de conhecimentos. Sem a sua ajuda este trabalho não teria o mesmo brio.

Agradeço ainda ao Engenheiro Vítor Silva pela sua disponibilidade para a ajuda durante os desenvolvimentos experimentais realizados no DEC / FCT – UNL.

Por fim, o maior agradecimento vai para a minha família, cujo apoio, carinho, amor, e também palavras de incentivo e coragem que sempre me transmitiram, permitiram que a realização do meu percurso académico se tornasse deveras mais fácil.

RESUMO

Esta dissertação surge com o intuito de se realizar um estudo de estruturas históricas e tradicionais, cuja construção fosse, especificamente, de alvenaria de pedra. Assim sendo, o presente trabalho insere-se no âmbito da reabilitação de paredes de alvenaria com tais características, com vista a ajudar a manter e preservar o património histórico edificado.

Uma vez que, a reabilitação de construções antigas necessita de um conhecimento específico, tanto das propriedades dos materiais como das tipologias das paredes de alvenaria, foi realizado um estudo com a finalidade de se obter essas informações sobre paredes de alvenarias de pedra.

Escolheram-se várias paredes de alvenaria de pedra, resultantes de ruínas ou de demolições, para a realização deste estudo, as quais foram fotografadas, e posteriormente, retiradas amostras das suas secções transversais assim como de algumas dos seus alçados. Para além de um levantamento tipológico das paredes de alvenaria de pedra escolhidas, os materiais existentes nessas alvenarias foram também exaustivamente identificados.

Foi realizada também uma análise das paredes de alvenaria de pedra relativamente às áreas dos materiais e vazios, diâmetros e menores dimensões desses mesmos vazios e foi feita uma classificação das alvenarias quanto ao número de panos e tipo de conexão entre eles.

Descrevem-se também os ensaios realizados em laboratório, quanto à granulometria, porosidade, análise termo gravimétrica e de carbonatação (por fenolftaleína) dos materiais existentes nas paredes escolhidas para o estudo.

Em suma, este trabalho serviu para um melhoramento dos conhecimentos, assim como obter informações importantes para futuros trabalhos de reabilitação envolvendo paredes de alvenaria de pedra antigas.

Termos chave: paredes de alvenarias de pedra, argamassa de cal aérea, reparação e reabilitação, técnicas de diagnóstico estrutural, caracterização de alvenarias

ABSTRACT

This thesis arises in order to conduct a detailed study of historical and traditional structures, specifically stone masonry constructions. Therefore, this work falls within the rehabilitation of stone masonry walls with such characteristics, in order to help maintain and preserve the historical buildings.

Since the rehabilitation of ancient constructions requires a particular knowledge, such as the properties of the materials and the typologies of masonry walls, an extensive study was carried out in order to obtain information regarding stone masonry walls.

Several stone masonry walls, resulting from ruins or demolition were sought, to carry out this study. The walls were photographed, and afterwards, samples were taken of their cross sections. In addition to a typological survey of the chosen masonry walls, the masonry materials have also been exhaustively identified.

It had also been made an analysis of the areas of materials and voids and diameters of those voids and was made a classification of masonry cross sections regarding the number and type connection between them.

The tests performed in laboratory such as grain size, porosity, and thermal gravimetric analysis and carbonation (per phenolphthalein) to the stone masonry materials were also described.

To sum up, the aim of this work was to improve the knowledge of ancient stone masonry walls, as well as to obtain important information for future rehabilitation work.

Keyword terms: stone masonry walls, lime mortar, repair and rehabilitation, structural diagnostic techniques, masonry characterization

ÍNDICE DE TEXTO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2. CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA.....	5
2.1. CONSTRUÇÃO DE PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA.....	5
2.1.1. TÉCNICA	5
2.1.2. CARACTERÍSTICAS	5
2.1.3. MATERIAIS.....	7
2.1.3.1. PEDRAS	7
2.1.3.2. ARGAMASSA	7
2.2. CLASSIFICAÇÃO	8
2.2.1. CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DAS PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA	9
2.2.2. CLASSIFICAÇÃO DA TIPOLOGIA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS.....	10
2.2.3. CLASSIFICAÇÃO DA TIPOLOGIA DOS ALÇADOS.....	12
2.3. FENÓMENOS DE DETERIORAÇÃO DAS ALVENARIAS.....	13
2.3.1. IMPORTÂNCIA DE ENSAIOS <i>IN SITU</i> COM VISTA A IDENTIFICAR O ESTADO DE DETERIORAÇÃO.....	14
2.3.2. IMPORTÂNCIA DA EXISTÊNCIA DE UM PROJECTO PARA INVESTIGAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS PARA ESTUDO	15
2.4. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO ESTRUTURAL.....	16
2.4.1. TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS.....	16
2.4.2. TÉCNICAS LIGEIRAMENTE DESTRUTIVAS	17
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	19
3.1. DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	19
3.1.1. RECOLHA DE AMOSTRAS	20
3.1.2. CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DAS PAREDES DE ALVENARIA	21

3.1.2.1. Secções transversais	24
3.1.2.2. Alçados.....	27
3.1.3. CLASSIFICAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA ESTUDADAS	28
3.1.3.1. Secções transversais	28
3.1.3.2. Alçados.....	34
3.1.4. CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA ATRAVÉS DE FOTOGRAFIAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL E DO ALÇADO	36
3.1.4.1. Secções transversais	36
3.1.4.2. Alçados.....	41
3.1.5. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	42
3.1.6. POROSIDADE ABERTA E MASSA VOLUMICA.....	43
3.1.7. POROMETRIA	45
3.1.8. ANÁLISE TERMO GRAVIMÉTRICA	50
3.1.9. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	51
3.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
3.2.1. CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA – SÍNTESE	53
3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA – QUANTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS	56
3.2.2.1. Secções transversais	56
3.2.2.2. Alçados.....	59
3.2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA – ÁREAS, DIÂMETROS E MENORES DIMENSÕES DOS VAZIOS	60
3.2.3.1. Áreas dos vazios das alvenarias	61
3.2.3.2. Diâmetros e menor dimensão dos vazios das alvenarias	64
3.2.4. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	66
3.2.5. POROSIDADE ABERTA	72
3.2.6. DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	76
3.2.7. ANÁLISE TERMO GRAVIMÉTRICA	77
3.2.8. POROMETRIA	82
4. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	91
5. BIBLIOGRAFIA.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de construção com alvenarias de pedra (zona “Faculdade”)	2
Figura 2.1 – Exemplo de perpianho (ou travadouro) numa parede de alvenaria [12]	6
Figura 2.2 – Deformação e colapso de um dos panos exteriores de uma parede de alvenaria de pedra [10]	8
Figura 2.3 – Forma de representação das secções transversais [10]	9
Figura 2.4 – Exemplos esquemáticos de secções transversais e alçados [10]	10
Figura 2.5 – Classificação das paredes de alvenaria de pedra. [12]	11
Figura 2.6 – Tipo de aparelho [39]	12
Figura 2.7 – Tipo de assentamento [39]	13
Figura 2.8 - Classificação dos diferentes tipos de acções em estruturas e seus materiais [30]	14
Figura 2.9 – Técnicas de diagnóstico estrutural [10]	15
Figura 3.1 – Localização das paredes em estudo	20
Figura 3.2 – Locais da recolha das amostras em cada uma das paredes	20
Figura 3.3 – Argamassas de cal aérea com grumos de cal carbonatada	22
Figura 3.4 – Secções transversais da zona “Moinho”	28
Figura 3.5 – Secções transversais da zona “Charneca”	29
Figura 3.6 – Secções transversais da zona “Vila Nova”	30
Figura 3.7 – Secções transversais da zona “Faculdade”	31
Figura 3.8 – Secções transversais da zona “Pilotos”	31
Figura 3.9 – Alçados da zona “Pilotos”	34
Figura 3.10 – Esquemas das secções transversais da zona “Moinho”	37
Figura 3.11 - Esquemas das secções transversais da zona “Charneca”	38
Figura 3.12 - Esquemas das secções transversais da zona “Faculdade”	39
Figura 3.13 - Esquemas das secções transversais da zona “Vila Nova”	39
Figura 3.14 - Esquemas das secções transversais da zona “Pilotos”	40
Figura 3.15 - Esquemas dos alçados da zona “Pilotos”	41

Figura 3.16 – Agitador mecânico de peneiros.....	42
Figura 3.17 – Balança digital	43
Figura 3.18 – Amostras utilizadas no ensaio de porosidade aberta.....	44
Figura 3.19 – Ensaio de porosidade aberta.....	45
Figura 3.20 – Classificação do tamanho do poro de acordo com a IUPAC – União Internacional de Química Pura e Aplicada [31].....	46
Figura 3.21 – Amostras dos materiais utilizados no ensaio de porometria por intrusão de mercúrio	47
Figura 3.22 – Distribuição de poros de dimensões muito variadas de uma argamassa com cal – Imagem obtida através de um <i>Scanning electron microscope</i> [42] (esquerda) e Esquema representativo da intrusão e extrusão do mercúrio em casos de poros de dimensões maiores que os canais de acesso a estes (direita) [19].....	48
Figura 3.23 - Porosímetro de mercúrio modelo <i>Autopore IV 9500</i>	49
Figura 3.24–Termo balança Netzschsta 449 F3 Jupiter	50
Figura 3.25 – Indicadores de Ph – Comparação entre a fenolftaleína e outros indicadores [43]	52
Figura 3.26 – Espessuras médias das alvenarias em estudo (esquerda) e alvenarias de Tentúgal (direita) [39].....	53
Figura 3.27 – Tipo de secção transversal das alvenarias em estudo (esquerda) e alvenarias de Tentúgal (direita) [39].....	54
Figura 3.28 – Tipo de aparelho das alvenarias em estudo (esquerda) e alvenarias de Tentúgal (direita) [39].....	54
Figura 3.29 – Tipo de assentamento das alvenarias em estudo (esquerda) e alvenarias de Tentúgal (direita) [39].....	55
Figura 3.30 – Parede F da zona “Pilotos” – Assentamento do tipo “calços e cunhas”	55
Figura 3.31 – Áreas de materiais por parede da zona “Charneca”	56
Figura 3.32 - Áreas de materiais por parede da zona “Vila Nova”	57
Figura 3.33 - Áreas de materiais por parede da zona “Moinho”	57
Figura 3.34 - Áreas de materiais por parede da zona “Faculdade”	58
Figura 3.35 - Áreas de materiais por parede da zona “Pilotos”	58
Figura 3.36 - Áreas de materiais por parede da zona “Pilotos”	59

Figura 3.37 – Áreas dos vazios por intervalos das secções transversais da zona “Charneca”	61
Figura 3.38 – Áreas dos vazios por intervalos das secções transversais da zona “Moinho”	61
Figura 3.39 – Área dos vazios por intervalos das secções transversais da zona “Vila Nova”	62
Figura 3.40 – Áreas dos vazios por intervalos das secções transversais da zona “Faculdade”	62
Figura 3.41 – Áreas dos vazios por intervalos das secções transversais da zona “Pilotos”	62
Figura 3.42 – Dimensões (áreas) dos vazios das secções transversais estudadas por L. Binda em 1997 [9]	63
Figura 3.43 – Diâmetro (esquerda) e menor dimensão dos vazios (direita) por intervalos das secções transversais da zona “Charneca”	64
Figura 3.44 - Diâmetro (esquerda) e menor dimensão dos vazios (direita) por intervalos das secções transversais da zona “Vila Nova”	65
Figura 3.45 – Diâmetro (esquerda) e menor dimensão dos vazios (direita) por intervalos das secções transversais da zona “Moinho”	65
Figura 3.46 – Diâmetro (esquerda) e menor dimensão dos vazios (direita) por intervalos das secções transversais da zona “Pilotos”	65
Figura 3.47 – Diâmetro (esquerda) e menor dimensão dos vazios (direita) por intervalos das secções transversais da zona “Faculdade”	66
Figura 3.48 – Curva granulométrica da parede A da zona “Moinho”	67
Figura 3.49 - Curva granulométrica da parede A da zona “Charneca”	67
Figura 3.50 - Curva granulométrica da parede B da zona “Charneca”	68
Figura 3.51 - Curva granulométrica da parede C da zona “Charneca”	68
Figura 3.52 - Curva granulométrica da parede D da zona “Charneca”	69
Figura 3.53 - Curva granulométrica da parede A da zona “Vila Nova”	69
Figura 3.54 - Curva granulométrica da parede B da zona “Vila Nova”	70
Figura 3.55 - Curva granulométrica da parede A da zona “Faculdade”	70
Figura 3.56 - Curva granulométrica da parede B da zona “Faculdade”	71
Figura 3.57 - Curva granulométrica da parede A da zona “Pilotos”	71
Figura 3.58 - Curva granulométrica da parede C da zona “Pilotos”	72
Figura 3.59 – Grau de carbonatação em função da humidade relativa do ambiente [43]	76

Figura 3.60 – Amostras ensaiadas na determinação da existência de carbonatação. (Amostras antes do ensaio são apresentadas à esquerda e à direita são apresentadas as amostras depois do ensaio)	77
Figura 3.61 – Curvas termo gravimétricas das argamassas. (Curva verde - Cal aérea sem grumos de cal carbonatada; Curva vermelha – Cal aérea com grumos de cal carbonatada).....	78
Figura 3.62 - Curvas termo gravimétricas e derivadas, das argamassas. (Curva verde - Cal aérea sem grumos de cal carbonatada; Curva vermelha – Cal aérea com grumos de cal carbonatada)	79
Figura 3.63 - Amostra de argamassa de cal aérea com grumos de cal carbonatada.....	80
Figura 3.64 – Amostra de argamassa de cal aérea sem grumos de cal carbonatada.....	81
Figura 3.65 - Curvas de intrusão cumulativa de mercúrio em ml/g dos materiais	83
Figura 3.66 - Curvas de intrusão cumulativa de mercúrio em percentagem dos materiais	84
Figura 3.67 Curvas de intrusão incremental de mercúrio em percentagem dos materiais	85
Figura 3.68 - Curvas de intrusão incremental de mercúrio em ml/g dos materiais	85
Figura 3.69 – Classificação segundo a dimensão dos poros dos materiais	86
Figura 3.70 – Área porosa dos materiais	87
Figura 3.71 - Volume de mercúrio introduzido por tipo de poro em percentagens.....	88

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Materiais das paredes de alvenaria	22
Quadro 3.2 – Materiais das paredes de alvenaria	23
Quadro 3.3 – Descrição das paredes da zona “Moinho”	24
Quadro 3.4 - Descrição das paredes da zona “Pilotos”	24
Quadro 3.5 - Descrição das paredes da zona “Vila Nova”	25
Quadro 3.6 - Descrição das paredes da zona “Faculdade”	25
Quadro 3.7 - Descrição das paredes da zona “Charneca”	26
Quadro 3.8 - Descrição das paredes da zona “Pilotos”	27
Quadro 3.9 – Classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos	32
Quadro 3.10 - Classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos	32
Quadro 3.11 - Classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos	33
Quadro 3.12 - Classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos	33
Quadro 3.13 - Classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos	34
Quadro 3.14 – Classificação das paredes quanto ao assentamento das fiadas e ao tipo de aparelho.....	35
Quadro 3.15 – Médias percentuais dos materiais das paredes da zona “Charneca”	56
Quadro 3.16 - Médias percentuais dos materiais das paredes da zona “Vila Nova”	57
Quadro 3.17 - Médias percentuais dos materiais das paredes da zona “Moinho”	57
Quadro 3.18 - Médias percentuais dos materiais das paredes da zona “Faculdade”	58
Quadro 3.19 - Médias percentuais dos materiais das paredes da zona “Pilotos” - secções transversais	58
Quadro 3.20 - Média percentual dos materiais das secções transversais de todas as zonas	59
Quadro 3.21 – Médias percentuais dos materiais das paredes da zona “Pilotos” – alçados.....	59

Quadro 3.22 – Análise percentual da granulometria da parede A da zona “Moinho”	66
Quadro 3.23 - Análise percentual da granulometria das paredes da zona “Charneca”	69
Quadro 3.24 - Análise percentual da granulometria das paredes da zona “Vila Nova”	70
Quadro 3.25 - Análise percentual da granulometria das paredes da zona “Faculdade”	71
Quadro 3.26 - Análise percentual da granulometria das paredes da zona “Pilotos”	72
Quadro 3.27 – Porosidade aberta e massa volúmica das pedras	73
Quadro 3.28 - Porosidade aberta e massa volúmica das argamassas com agregados de componentes arenosas.....	74
Quadro 3.29 - Porosidade aberta e massa volúmica das argamassas com agregados de componentes argilosas	75
Quadro 3.30 – Massas molares das moléculas	79
Quadro 3.31 – Quadro resumo referente ao ensaio da argamassa de cal aérea com grumos de cal carbonatada	80
Quadro 3.32 - Quadro resumo referente ao ensaio da argamassa de cal aérea sem grumos de cal carbonatada	81
Quadro 3.33 – Volume de mercúrio introduzido por tipo de poro em mL/g	88

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O presente trabalho de investigação tem como base o aumento de intervenções de reabilitação de edifícios antigos, durante os últimos anos. Este facto deve-se, por um lado, a uma necessidade de conservar o património histórico edificado, protegendo assim bens culturais e a identidade do edifício e local em que se encontra. Por outro lado, deve-se também à realidade de que é indispensável a existência de um desenvolvimento sustentável nas cidades, o qual leva a um menor impacto ambiental e visual comparando com a construção de novos edifícios.

É nos centros urbanos que é mais visível a progressiva degradação da maioria do edificado antigo. Os edifícios históricos existentes nos centros urbanos são frequentemente caracterizados por um meio edificado complexo de casas simples e por uma escolha pouco selectiva dos materiais e técnicas de construção, de acordo com a época em que foram construídos, mas dignos de serem preservados como uma importante parte dos centros históricos e património cultural. Contudo, apesar dos edifícios antigos fazerem parte do legado cultural deixado pelos antepassados, são eventualmente deixados ao abandono e sem manutenção, levando à sua degradação.

Uma grande parte dos monumentos históricos mais importantes e tidos em maior consideração, foram mais cuidados e mantidos ao longo do tempo. Uma vez que foram cuidados, a sua deterioração não representa um risco imediato, mas é necessário independentemente disso, um estudo para se conhecer e perceber o seu comportamento estrutural.

A reabilitação de edifícios antigos exige um conhecimento profundo das técnicas de construção e dos materiais utilizados no edificado, uma vez que a escolha de soluções compatíveis leva a melhores aproximações de desempenho. Para além disso, em intervenções de reabilitação, deve-se ter como princípio o recurso a soluções não intrusivas ou o menos intrusivas possível, para que as soluções adoptadas na intervenção sejam o mais próximo possível do existente. Deste modo, é necessário a realização de estudos das estruturas antigas para melhor conhecimento e compreensão do seu comportamento.

Relativamente ao caso específico das paredes de alvenaria de pedra antigas, tema focado no presente trabalho, já foram realizados alguns estudos com o intuito de obter informações sobre as suas propriedades. As paredes de alvenaria de pedra são constituídas por pedras, argamassas, essencialmente de cal aérea e restos de materiais existentes no meio em que a estrutura se situa (Figura 1.1). Na maioria dos casos, a alvenaria consiste num acumulado de várias camadas de pedras, maioritariamente com formato irregular. As alvenarias de pedra são estruturas heterogéneas e bastante complexas, em termos de ligações e interacções entre materiais. Um dos exemplos a ser dado pode ser o das diferentes formas e dimensões das pedras que, podendo ser de formato arredondado, ou trabalhadas mas de forma irregular, não conferem estabilidade suficiente para a construção de um pano simples sem a utilização de uma argamassa como ligação [11].

Alguns investigadores, como Luigia Binda, do Instituto Politécnico de Milão, têm estudado e caracterizado as paredes de alvenaria de pedra. Têm sido feitos estudos quando à porosidade global da parede tendo como referência a quantificação das áreas dos vazios das suas secções transversais, quantificação esta, realizada a partir da análise de fotografias à escala natural (E1:1). Usando também essas fotografias das secções transversais é analisada a percentagem de cada um dos diferentes materiais e também pode ser feita uma classificação da parede de alvenaria quanto à sua espessura, ao número de panos e tipo de conexão entre os mesmos. Os vazios são ainda estudados mais pormenorizadamente, sendo medidos os diâmetros e as menores dimensões, informações importantes para trabalhos de reabilitação que envolva injeções de caldas. Para além da análise das secções transversais, os alçados das paredes de alvenaria de pedra também o são. É realizada uma classificação dos alçados relativamente à disposição das pedras, mais concretamente, tipo de assentamento e tipo de aparelho.

São realizados também, estudos aos materiais existentes nas alvenarias. Os materiais são analisados de modo a obterem-se informações quanto às suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Após recolhido e analisado todo um conjunto de informações, como as referidas anteriormente, fica-se com um conhecimento mais aprofundado sobre as alvenarias de pedra, assim como se torna mais fácil, a compreensão do comportamento global das referidas alvenarias.

Estes são só alguns dos ensaios/estudos, da larga panóplia existente, utilizados para a caracterização das paredes de alvenaria de pedra. Foi no seguimento destes estudos já realizados, com maior incidência em Itália, que a presente dissertação se baseou.



Figura 1.1 – Exemplo de construção com alvenarias de pedra (zona “Faculdade”)

1.2. Objectivos

Este trabalho foi realizado com o intuito de estudar características de alvenarias de pedra antigas, assim como a sua composição e morfologia, para que se possam conhecer as possibilidades de preservação, reparação e ou reabilitação e também de compreender o seu comportamento no global e saber qual a função que cada um dos materiais tem nesse mesmo comportamento.

Para tal, foram recolhidas várias amostras das paredes de alvenaria de pedra escolhidas para o estudo, de diferentes locais da cidade de Almada e também, mais especificamente, de diferentes pontos das paredes. Seguidamente foram analisadas em laboratório, para se identificar e caracterizar os materiais utilizados nesse tipo de construções.

A acção de reabilitar um edifício tem como principal objectivo incrementar o seu desempenho para níveis superiores aos existentes. Salienta-se, entre outros, o aumento da capacidade de resistência a acções exteriores, como por exemplo a acção sísmica, ventos e chuvas. Para que isso se faça de forma o mais eficiente possível, é necessário conhecer as propriedades dos materiais e da alvenaria como um todo. É nesse sentido que o presente trabalho foi efectuado.

1.3. Organização do texto

Este trabalho de investigação que visa o estudo e caracterização de alvenarias de pedra antigas é composto por quatro capítulos:

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Caracterização das paredes de alvenaria de pedra

Capítulo 3 – Desenvolvimento experimental

Capítulo 4 – Conclusões e desenvolvimentos futuros.

Na introdução faz-se o enquadramento do trabalho e apresenta-se o objectivo do mesmo e da sua organização.

O capítulo 2 por sua vez, está dividido em quatro secções:

Na secção 1 fala-se das técnicas de construção das paredes de alvenaria de pedra, das suas características e dos materiais das alvenarias designadamente pedras e argamassas.

Na secção 2 abordam-se as formas de classificação utilizadas em secções transversais e alçados das paredes de alvenaria de pedra.

A secção 3 do capítulo 2 descreve os fenómenos de deterioração das alvenarias e da relevância de ensaios *in situ* para se detectar o estado de deterioração das paredes em estudo, assim como da existência de uma metodologia de investigação e de avaliação dos resultados do estudo. Em seguida o ponto 4 trata das técnicas de diagnóstico e da sua classificação.

O capítulo 3 indica, pormenorizadamente, os procedimentos dos diversos ensaios realizados no âmbito deste trabalho para se estudar alvenarias de pedra antigas. Na primeira secção do mesmo capítulo descrevem-se os procedimentos experimentais e a respectiva recolha de amostras, os materiais encontrados nas paredes em estudo, a classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre os ditos panos e também a caracterização das paredes de alvenaria de pedra através das fotografias das secções transversais e dos alçados. Os procedimentos experimentais realizados foram análise granulométrica, ensaios de porosidade e massa volúmica, análise termo gravimétrica e ensaio de carbonatação com solução alcoólica de fenolftaleína. Na secção 2 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados anteriormente e caracterizam-se as alvenarias estudadas quanto aos materiais e vazios.

O quarto capítulo conclui o trabalho, de forma a vincar que o mesmo teve como objectivo primordial contribuir para um melhor conhecimento das paredes de alvenarias de pedra antigas, dos seus materiais e que este directa ou indirectamente deve ser uma mais - valia e um contributo para a preservação, conservação, reutilização, reabilitação, reconstrução, e valorização do que foi anteriormente construído.

2. CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA

2.1. Construção de paredes de alvenaria de pedra

2.1.1. Técnica

A constituição das paredes de alvenaria de pedra é caracterizada normalmente pela predominância de materiais cuja aquisição pode ser feita em local próximo da obra em si. São paredes constituídas por pedras de tamanhos e formas, irregulares e diversas, assentes em argamassas de cal aérea, tentando sempre que a disposição das pedras seja realizada em camadas mais ou menos uniformes. Por vezes, existem pedaços de pedras de pequenas dimensões (seixos) e elementos cerâmicos, no interior da parede como enchimento e também entre as pedras que constituem os panos da parede (com a função de calços). As paredes de alvenaria de pedra podem ou não ser rebocadas e pintadas com cal e pigmentos naturais [35].

A construção deste género de alvenarias tem como base um conjunto de regras que nem sempre foram cumpridas. Para a realização destas alvenarias devem, primeiramente, ser abertos caboucos e marcadas as zonas em que irão existir portas. Seguidamente enchem-se os caboucos com pedras até atingir o nível do terreno, podendo também ser usado argamassas de cal ou até argila para regularizar esse local. As bases das alvenarias devem ser feitas com pedras de grandes dimensões, dispostas em direcção perpendicular à direcção da parede e de forma a ficarem estáveis sem a ajuda de calços. Procede-se ao levantamento dos panos colocando as pedras em camadas assentes em argamassa e realiza-se o enchimento entre panos com uma mistura de argamassa e restos de pedras e outros materiais (entulho), tendo o cuidado de molhar as pedras antes de assentá-las e ao fazer isso, deve-se assentar pela parte mais lisa para haver maior estabilidade e uma melhor ligação (aderência) à argamassa [25].

O processo construtivo é descrito por pontos em seguida:

- 1) Fundações;
- 2) Marcação (definição da espessura);
- 3) Selecção, preparação e colocação das pedras (dos cunhais e vãos para o centro);
- 4) Preenchimento dos espaços entre pedras (entulho com argamassa);
- 5) Garantir uma boa ligação entre fiadas;
- 6) Garantir verticalidade.

2.1.2. Características

Após análise de estudos realizados por vários autores como G. Baronio e L. Binda, pode-se reter que as principais características das paredes de alvenaria de pedra são:

- Heterogeneidade de materiais, uma vez que existem diversos materiais distintos tais como pedras, argamassa, tijolos, etc.
- Falta de adesão entre pano exterior e pano interior da alvenaria
- Adesão fraca entre pedras e argamassa
- Elevada espessura e peso próprio
- Limitação quanto à dimensão aquando de construções em altura
- Argamassa com fraca coesão nas juntas e no enchimento juntamente com o “entulho”
- Porosidade da parede elevada devido à presença de vazios
- Possibilidade de existência de paredes divisórias com funções estruturais de suporte de cargas
- Alto teor de humidade devido à penetração de água
- Inércia térmica conseguida com uma grande espessura
- Bom isolamento aos ruídos aéreos
- Boa resistência à compressão
- Juntas entre pedras pouco resistentes à tracção
- Pode ou não possuir reboco
- Execução morosa, dispendiosa e cada vez mais dificultada devido à falta de mão-de-obra especializada [9].

Outra característica que é possível encontrar nas paredes de alvenaria de pedra com mais de um pano é a existência de pedras colocadas transversalmente ao longo de toda a espessura da parede, fazendo a conexão entre os panos. Estas pedras designam-se por perpianhos ou travadouros (Figura 2.1) e a sua colocação nas paredes de alvenaria faz com que a parede seja mais sólida e estável.

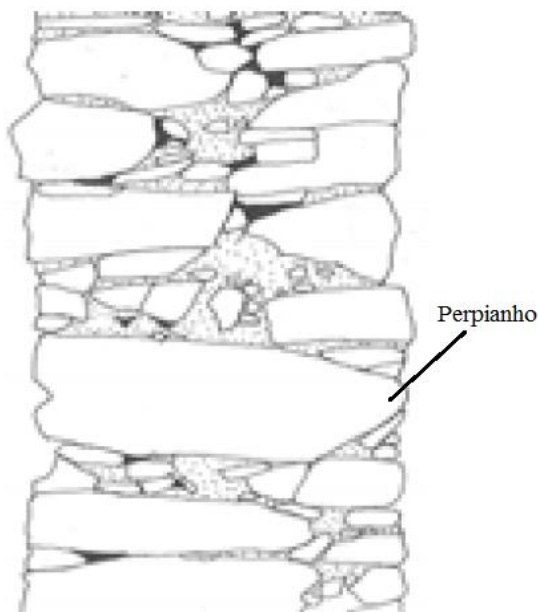


Figura 2.1 – Exemplo de perpianho (ou travadouro) numa parede de alvenaria [12]

2.1.3. Materiais

2.1.3.1. Pedras

Para a construção deste tipo de paredes usavam-se pedras de dimensões variadas, habitualmente de materiais existentes nas redondezas da zona da obra, que eram assentes em fiadas relativamente niveladas. No espaço entre estas pedras era colocada argamassa de modo a fazer-se uma ligação mais forte entre pedras e também para aumentar a estabilidade destas. As pedras de dimensões mais reduzidas eram adicionadas juntamente com argamassa de cal aérea e outros restos de materiais, de modo a preencher (enchimento) os espaços deixados entre panos [7].

As pedras utilizadas na construção dos panos das alvenarias tinham normalmente um formato irregular, podendo estas ter sido também trabalhadas com o objectivo de obter um formato irregular, quando isto não acontecia. Esta peculiaridade era tida em conta uma vez que as pedras ao terem formato arredondado não auferem à parede tanta estabilidade quanto as pedras trabalhadas com esse intuito.

2.1.3.2. Argamassa

Ao misturarmos água a ligantes, agregados finos, na sua maioria e, por vezes, adjuvantes e ou aditivos, obtêm-se uma mistura a que chamamos argamassa a qual é muito beneficiada nas suas propriedades pelos elementos acima referidos.

Pode-se dizer que o esqueleto da argamassa é o agregado, o qual ganha coesão pela sua ligação ao ligante. É por isso que a qualidade do ligante é muito importante no conjunto da pasta e no seu comportamento global e final. A reacção química da carbonatação das argamassas de cal é facilitada pela mistura de areia que separa as partículas de cal e também permite distribuir as retracções que possam ocorrer em toda a argamassa.

Os assentamentos de alvenarias e os revestimentos de elementos como por exemplo paredes, colunas, fachadas, etc. são objecto de acção por parte das ditas argamassas as quais variam segundo a sua dosagem, consistência, produção e com a natureza dos ligantes, os quais influenciam fortemente o comportamento das argamassas.

Análises a amostras recolhidas em alvenarias antigas provam que as suas argamassas são constituídas de cal aérea, fundamentalmente com hidróxido de cálcio como constituinte.

Estas argamassas têm as seguintes propriedades físicas, químicas e mecânicas:

- boa capacidade de deformação
- baixa resistência mecânica
- alta absorção capilar
- alta permeabilidade ao vapor de água
- baixa resistência aos ciclos gelo/degelo

2.2. Classificação

Uma análise estrutural ponderada, apropriada e lógica pode ajudar na definição do grau de risco e na previsão do futuro comportamento das estruturas, para além de fornecer informações importantes para trabalhos de reparação e/ou reabilitação. Para isso, é necessário a definição das propriedades dos materiais e a implementação de análise de estruturas danificadas.

Havendo vários tipos de alvenaria de pedra, os respectivos desempenhos e comportamentos estruturais podem ser compreendidos estudando os seguintes factores:

- a sua geometria;
- a composição da sua secção transversal (pano simples, duplo ou triplo, tipo de conexão entre panos, juntas vazias ou preenchidas com argamassa, propriedades físicas, químicas e mecânicas dos elementos (pedras, argamassas, elementos cerâmicos));
- as características da alvenaria como um todo.

Em alvenarias de pano duplo, por exemplo, a composição da secção transversal influencia a capacidade de suporte da parede e por vezes não consegue ser identificada facilmente. Além disso, a resistência característica e a rigidez de um material não homogéneo são de difícil determinação experimentalmente, uma vez que os parâmetros de resistência e deformabilidade dos materiais, no seu conjunto, não correspondem à resistência e deformabilidades globais da parede [8].

Uma parede de alvenaria, construída de acordo com as regras mencionadas em 2.1.1. deverá ter um comportamento monolítico. Se esse comportamento não se verifica numa direcção lateral, constata-se um dos defeitos mais comuns que uma parede de alvenaria de pedra pode ter. Isto pode acontecer quando, por exemplo, a parede é construída com pedras de dimensões reduzidas ou constituída por dois panos exteriores que não estão devidamente conectados e que contêm enchimento de pedras de dimensões reduzidas (seixos). Estas situações fazem com que a parede se torne mais frágil principalmente quando são aplicadas forças em direcção horizontal ou forças verticais excêntricas. Quando existem estas ocorrências, individualmente ou em grupo, a parede deforma-se e pode chegar à ruptura e colapso [10]. O fenómeno descrito é ilustrado na Figura 2.2.

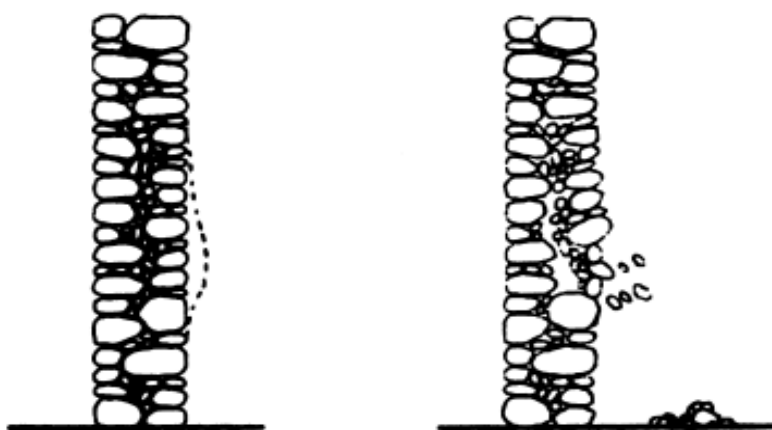


Figura 2.2 – Deformação e colapso de um dos panos exteriores de uma parede de alvenaria de pedra [10]

2.2.1. Caracterização qualitativa e quantitativa das paredes de alvenaria de pedra

Estudos referentes à identificação dos materiais e das dimensões dos vazios, unicamente através de uma avaliação visual, podem ser um bom ponto de partida para uma classificação de diferentes secções transversais, especialmente em alvenarias com mais de um pano, tendo-se sempre em conta que uma análise estrutural correcta das paredes de alvenaria só pode ser realizada impondo alguns critérios de modo a identificar grupos de paredes de alvenarias semelhantes.

L. Binda propôs uma metodologia de avaliação das secções transversais das paredes, através da avaliação de fotografias tiradas às secções pretendidas (Figura 2.3), em escala de (1:1), e através dessas imagens medir as percentagens de pedras, argamassa e vazios e também o tamanho e distribuição dos vazios.

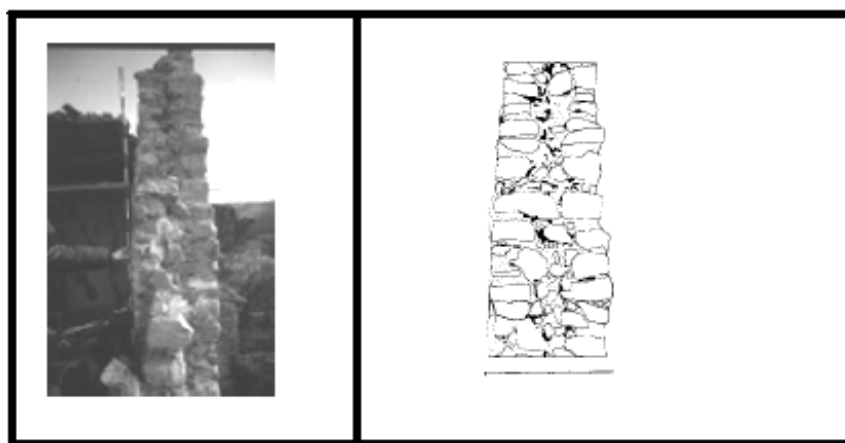


Figura 2.3 – Forma de representação das secções transversais [10]

A informação das referidas percentagens é importante e útil para a definição da geometria e do comportamento mecânico, as quais são necessárias para a estruturação de uma possível intervenção de reforço [8]. A diferença entre os diversos tipos de paredes de alvenaria não se deve unicamente à diversidade de materiais utilizados, de acordo com a época, costumes e zona em questão, mas também devido a métodos de construção distintos [12].

Segundo Luigia Binda e Antonella Saisi, num estudo realizado pelo Departamento de Engenharia Estrutural do Instituto Politécnico de Milão, baseado na percentagem referente à quantidade de pedras, vazios, argamassa, etc., resultantes da contabilização das suas áreas na secção transversal da alvenaria, afirmam que os dados obtidos, nesse estudo, permitem avaliar a capacidade de injectabilidade da parede fornecendo assim, informações importantes para futuras intervenções, enquanto que o estudo com base no número de panos e a conexão entre eles, permite formular várias hipóteses referentes ao comportamento estático da alvenaria como um todo [12].

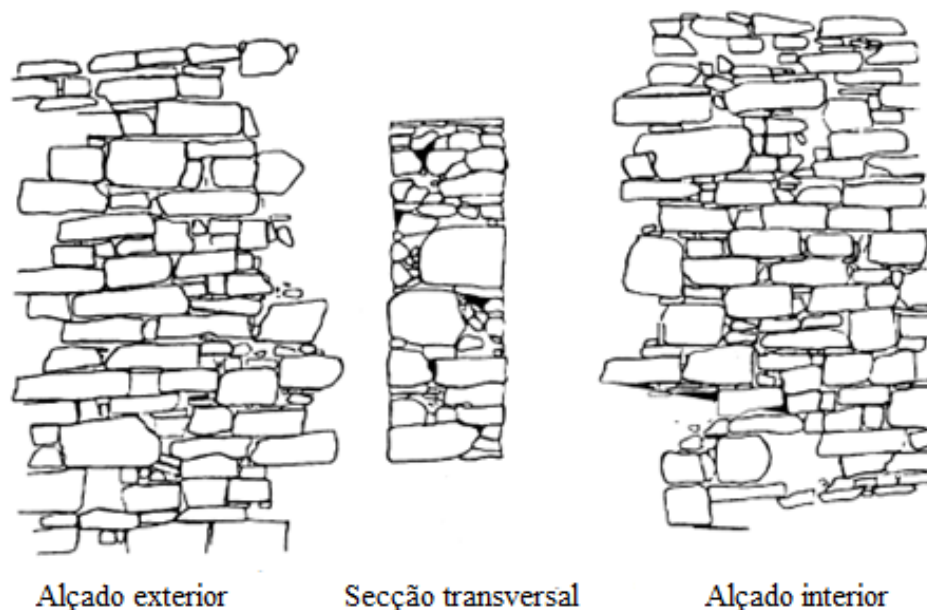


Figura 2.4 – Exemplos esquemáticos de secções transversais e alçados [10]

2.2.2. Classificação da tipologia das secções transversais

Giuffrè, professor no Instituto Politécnico de Milão, no início dos anos 90, levou a cabo os primeiros estudos sobre o comportamento mecânico das paredes de alvenaria de pedra, que consistiam em inspecções visuais para encontrar “regras” de construção, baseando-se nas secções transversais das alvenarias, as quais foram aprofundadas por L. Binda, catalogadas em 2002 e são apresentadas de seguida nas Figura 2.5.

Estas “regras”, atrás referidas, podem ser utilizadas para a classificação da tipologia das paredes de alvenaria. Parâmetros como o número de panos e o tipo de conexão entre eles são as referências para uma avaliação do comportamento mecânico dessas paredes.

Portanto, devido à existência de variados tipos de alvenarias de pedra, um estudo metódico do comportamento mecânico dessas alvenarias deve começar tendo em conta o número de panos que constituem a parede e o tipo de conexão, que pode ou não haver entre eles, tendo como base o trabalho realizado por Giuffrè e L. Binda.


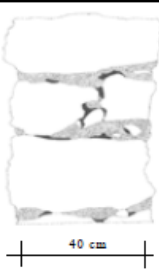






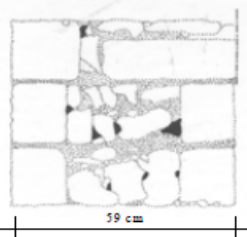
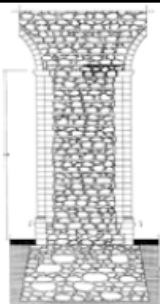

CLASS A: ONE LEAF SOLID WALL		
Single stone	Thick wall	
 <p>Catania Ca5s2</p>	 <p>Valgrande 2.2 - Trento</p>	 <p>Bardello Bar25.2 - Como</p>
CLASS B: TWO LEAVES		
Two leaves with no connection	Two leaves with simple connection made with overlapped stones	Two leaves with transversal connection made by long regular stones
 <p>Portis Ud9 Udine</p>	 <p>Sant'Antonio ai Monti - Sam8.1 - Como</p>  <p>Baiardo Ge8 - Imperia</p>	 <p>Carcente Ca27.1 - Como</p>
CLASS C: THREE LEAVES		
Three leaves with a thin internal leaf	Three leaves with thick internal leaf	Three leaves with thick internal leaf but referred to pillars and piers of churches and cathedrals
 <p>Matera Montescaglioso 7</p>	 <p>Matera Montescaglioso 9</p>	 <p>Cathedral of Noto Pillar</p>
CLASS D: DRY WALL		
 <p>Erbonne Er1.2 - Como</p>		

Figura 2.5 – Classificação das paredes de alvenaria de pedra. [12]

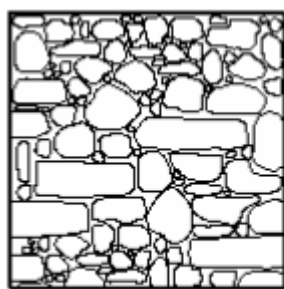
2.2.3. Classificação da tipologia dos alçados

O *Grupo Nazionale per la Difesa dai Terramoti*, um dos grupos nacionais de pesquisa científica, usado pelo Serviço Nacional de Protecção Civil de Itália faz a classificação das paredes de alvenaria de pedra tendo em conta parâmetros como o tipo de assentamento e o tipo de aparelho (Figura 2.6 e 2.7).

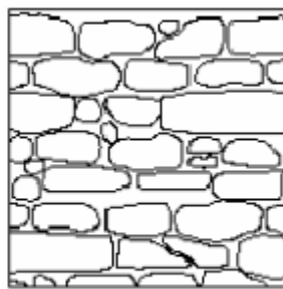
O tipo de acabamento ou aparelho está directamente relacionado com o tipo de assentamento. Estas classificações avaliam a disposição e regularidade das superfícies de assentamento. O tipo de aparelho avalia, mais especificamente, as juntas enquanto que o tipo de assentamento avalia a forma e disposição com que as pedras foram assentes.

O tipo de aparelho pode ser classificado como:

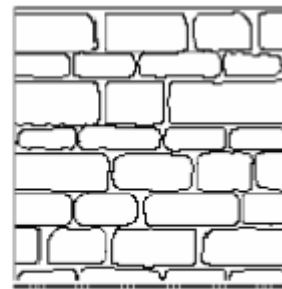
- Juntas desalinhadas
- Juntas irregulares alinhadas
- Juntas regulares alinhadas



Juntas desalinhadas



Juntas irregulares alinhadas



Juntas regulares alinhadas

Figura 2.6 – Tipo de aparelho [39]

O tipo de assentamento pode ser classificado como:

- Horizontal
- Horizontal / Vertical
- Aleatório
- Escalonado com fiadas de regularização
- “Espinhas de peixe”
- Com calços e cunhas

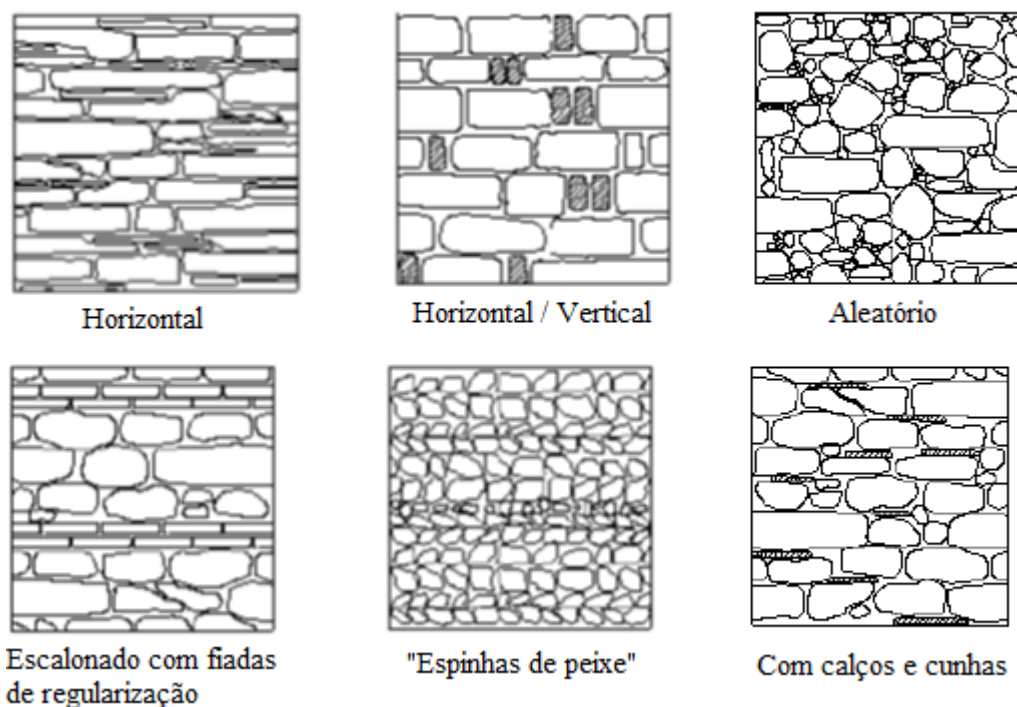


Figura 2.7 – Tipo de assentamento [39]

2.3. Fenómenos de deterioração das alvenarias

As paredes de alvenaria sujeitas a cargas exibem, frequentemente, fenómenos de deterioração mecânica típica, tais como:

- a formação de fissuras finas verticais;
- destacamento dos panos exteriores em paredes de alvenaria que não apresentam unicamente um pano.

As fissuras finas verticais, normalmente, não são atribuídas às causas mais comuns de problemas nas alvenarias tais como os sismos, assentamentos estruturais, incrementos de cargas exteriores aplicadas ou até deterioração química, física e mecânica dos materiais. Pelo contrário, essas fissuras são devidas ao peso da própria alvenaria. Acções variáveis como a acção do vento, variações térmicas e higroscópicas podem servir como um contributo equiparado a tensões de compressão [11].

Devido ao comportamento heterogéneo das paredes de alvenaria e devido ao seu peso próprio ser elevado, estados elevados de compressão constante levam a uma deformação da alvenaria ao longo do tempo e consequentemente, a uma degradação gradual da estrutura até ser atingido um estado de deformação excessivo e assim, ocorrer o colapso repentino da estrutura [11].

Para além disto, as propriedades dos materiais podem ser alteradas através de degradações devidas a acções físicas, químicas ou biológicas, diminuindo assim as suas qualidades. A porosidade, uma das propriedades dos materiais, e alguma eventual protecção existente, têm influência na velocidade das degradações, assim como na manutenção das estruturas e materiais (Figura 2.8). As

degradações tanto podem manifestar-se à superfície, sendo desde logo visíveis (eflorescências, porosidade elevadas, destacamentos, etc.), como também no interior, sendo necessário ensaios mais sofisticados nestes casos para as detectar [30].

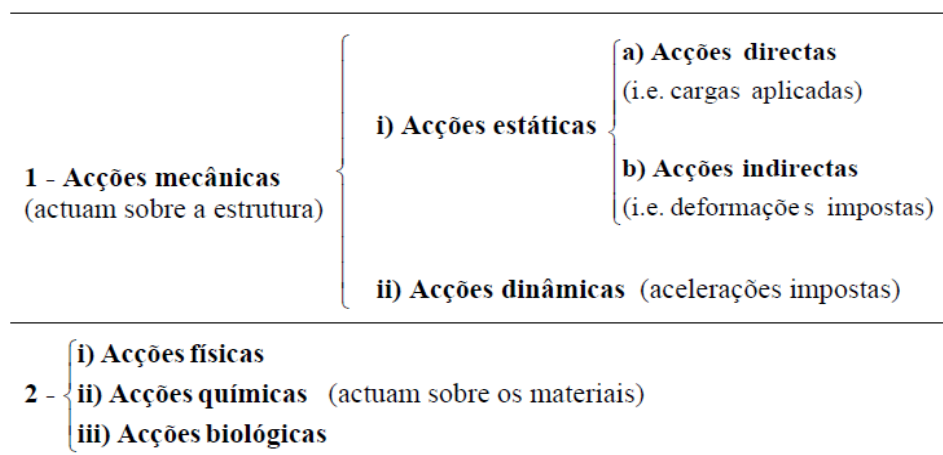


Figura 2.8 - Classificação dos diferentes tipos de acções em estruturas e seus materiais [30]

2.3.1. Importância de ensaios *in situ* com vista a identificar o estado de deterioração

A necessidade de estabelecer e reconhecer o estado de degradação e a capacidade de carga de uma estrutura surge por várias razões:

- determinação do coeficiente de segurança da estrutura
- mudança do tipo de uso do edifício ou acréscimo da estrutura do edifício
- determinação da eficiência das técnicas de reparo aplicadas na estrutura ou em materiais[11].

Nestes casos, os ensaios não destrutivos, podem ser úteis permitindo encontrar características das alvenarias que não são visíveis à vista desarmada, levando a que não seja necessário a realização de ensaios que alterem a aparência e constituição das alvenarias (ensaios destrutivos). A recolha de amostras, por sua vez, pode levar a más interpretações, quando esta não é efectuada da forma apropriada. Portanto, quando é necessário um conhecimento de uma alvenaria no seu geral, os resultados dos ensaios não destrutivos podem ser utilizados em conjunto com os resultados obtidos da recolha de amostras, sendo assim, de importante realização.

Os ensaios realizados *in situ*, actualmente, são essencialmente baseados na descoberta das propriedades físicas das alvenarias. No caso dos ensaios não destrutivos realizados *in situ*, a relação entre parâmetros medidos e propriedades físicas podem dar uma resposta relativamente ao comportamento global das ditas alvenarias. Os resultados obtidos através dos ensaios não destrutivos fornecem, na sua maioria, dados qualitativos (número de panos, tipo de conexão entre panos, etc.), mas também fornecem dados quantitativos (áreas dos materiais). Assim sendo é o investigador quem

tem que interpretar os resultados e usá-los, pelo menos, como comparação com outras partes da mesma estrutura de alvenaria ou usando diferentes técnicas não destrutivas [11].

2.3.2. Importância da existência de um projecto para investigação e avaliação dos resultados para estudo

A existência de uma panóplia de técnicas e procedimentos com o intuito de avaliar o comportamento e características das paredes de alvenaria, leva a uma acrescida dificuldade do projectista em escolher as técnicas e procedimentos mais apropriados, correctos e económicos para definir o estado de deterioração da estrutura a ser avaliada [13].

A Figura 2.9, que se insere no ponto seguinte, mostra as possíveis escolhas de ensaios que se podem realizar tanto *in situ* como em laboratório e as informações respectivas que se podem obter com cada um desses ensaios.

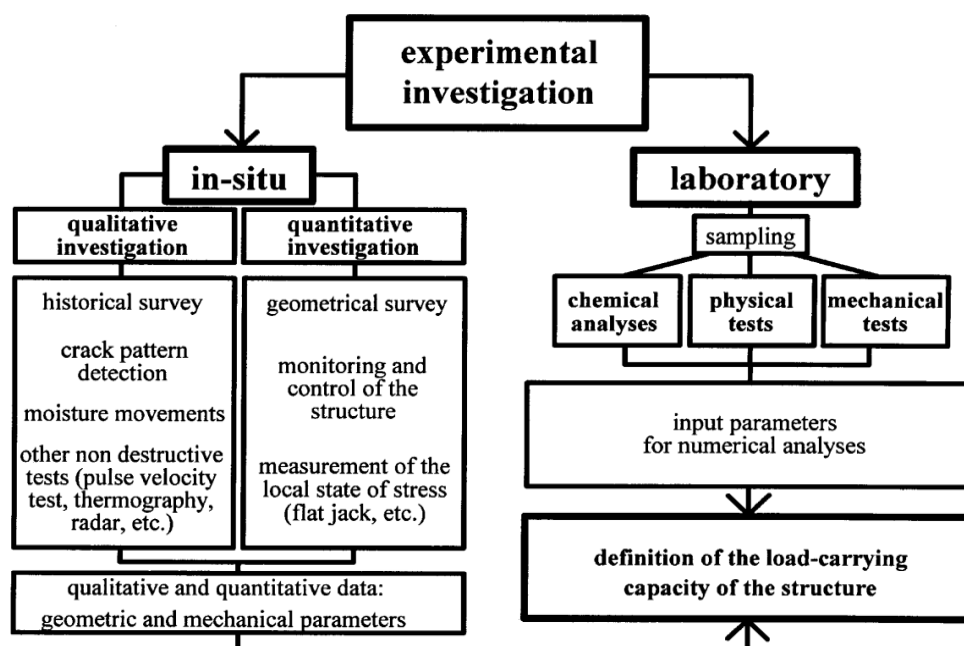


Figura 2.9 – Técnicas de diagnóstico estrutural [10]

2.4. Técnicas de diagnóstico estrutural

As técnicas de ensaio, em estruturas existentes, são geralmente classificadas em destrutivas, ligeiramente destrutivas e não destrutivas. Por razões óbvias de preservação do património histórico e cultural, as técnicas de ensaios destrutivos não devem ser utilizadas nas construções antigas com reconhecido valor histórico, pelo que não serão abordadas neste trabalho. Podem, no entanto, ser adoptadas, como potencialidade de fornecer resultados com significativa mais-valia científica, nos casos de outros tipos de construções, de épocas passadas, que estejam destinadas a demolição e não possuam qualquer valor histórico a preservar.

Resulta assim que, no caso das construções antigas de valor histórico e patrimonial, apenas as técnicas não destrutivas e ligeiramente destrutivas devem ser consideradas [11].

É também de referir que um diagnóstico fiável é fundamental para atingir o objectivo de incrementar o desempenho da estrutura para níveis superiores, bem como para salvaguardar intervenções desajustadas que contribuam para uma degradação precoce dos materiais e componentes da construção, com custos elevados para o utente. Para que isto não aconteça, é necessário fazer uma escolha prévia das técnicas de diagnóstico a realizar, de modo a ir ao encontro dos problemas encontrados, das soluções em vista e do “*output*” que cada técnica fornece. É apresentado na Figura 2.9 o tipo de testes existentes assim como os “*outputs*” de cada um deles.

2.4.1. Técnicas não destrutivas

Os ensaios que envolvem técnicas não destrutivas não requerem acções directas invasivas na estrutura e os resultados obtidos, sendo geralmente de tipo qualitativo, fornecem uma avaliação preliminar das características mecânicas dos materiais, nomeadamente através da definição de índices de qualidade dos mesmos [5].

Segundo L. Binda este género de técnicas podem servir para a detecção de parâmetros como:

- elementos estruturais ocultos
- qualificação dos materiais
- caracterização das zonas de heterogeneidade dos materiais
- avaliação da extensão dos danos mecânicos em estruturas fissuradas
- detecção de vazios e cavidades
- espessura da parede de alvenaria
- destacamentos
- avaliação do teor em humidade
- altura de ascensão capilar
- detecção de degradação superficial

- avaliação de propriedades físicas e mecânicas dos materiais [11] [9].

Técnicas como os ensaios sónicos, ensaios de radar, ensaios dinâmicos são técnicas não destrutivas, fornecem informações diferentes em relação às propriedades físicas da estrutura de alvenaria e são normalmente utilizadas como forma de complemento a outros testes [44]. A realização de um estudo fotográfico dessas secções transversais também se insere nas técnicas de ensaios não destrutivos. Através do estudo fotográfico das secções das alvenarias pode-se fazer uma quantificação das áreas dos materiais e, na maioria dos casos, é possível identificar vazios nessas secções das alvenarias [13].

2.4.2. Técnicas ligeiramente destrutivas

As técnicas de ensaio não destrutivas, não permitem, em geral, quantificar parâmetros que caracterizem o comportamento específico dos vários materiais constituintes duma estrutura, apesar de fornecerem uma visão qualitativa dos materiais, a informação mais detalhada sobre as características dos materiais deve, tanto quanto possível, ser apoiada em ensaios específicos que introduzem pequenas perturbações na estrutura [5].

Para perceber a constituição de uma parede de alvenaria, é necessário, por vezes, remover algumas pedras, tijolos ou argamassa do interior das secções transversais das alvenarias para posteriores ensaios em laboratório. Contudo, esta recolha de amostras pode ser em tão pequena quantidade que não altere a constituição inicial da estrutura.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Descrição dos Procedimentos Experimentais

Com o intuito de se proceder ao estudo das alvenarias de pedra antigas, foram realizados numa primeira fase trabalhos *in situ*, os quais tiveram a finalidade de pesquisar, recolher e proceder a uma pré análise de amostras e também de obter fotografias representativas das secções transversais e alçados dessas alvenarias. Numa segunda fase, foram realizadas análises quanto à geometria e características das alvenarias, através das fotografias tiradas (número de panos, conexão entre panos, tipo de aparelho, tipo de assentamento, quantificação dos materiais e vazios da parede assim como as dimensões dos vazios e características dos materiais – pedras, argamassa e tijolos), ensaios estes que se enquadram nas técnicas de ensaio não destrutivas.

As amostras previamente recolhidas foram submetidas a diversos ensaios, nomeadamente ensaios granulométricos, de porosidade aberta, análise termo gravimétrica, porometria por intrusão de mercúrio e determinação da existência de carbonatação nas argamassas, utilizando uma solução alcoólica de fenolftaleína.

A escolha das paredes de alvenaria, para a realização dos estudos neste trabalho, foi feita de uma forma coerente. Para essa escolha foi tida em conta a necessidade da visibilidade da secção transversal das alvenarias e por isso, foram escolhidas alvenarias com secção à vista resultantes de ruína ou até de demolição, de forma a retirar o máximo de dados possíveis para análises futuras. Relativamente aos alçados, foram escolhidas as que apresentavam a maior parte das suas faces sem o reboco, de modo a poder-se analisar a forma de assentamento e a disposição das pedras e argamassa.

Foram escolhidas, no total, dezasseis paredes (12 secções transversais e 4 alçados), mas só de quinze delas foram retiradas amostras. As paredes de alvenaria escolhidas foram provenientes de cinco locais diferentes apresentados na Figura 3.1. Foi tido em atenção, aquando da recolha das amostras das diferentes paredes de alvenaria, a necessidade de se obter uma quantidade suficiente e diversa de material, que permitisse a realização de todos os ensaios previstos.

Para além da avaliação das secções transversais das alvenarias, procedeu-se ao estudo de alçados, conforme estudos também realizados em Itália por investigadores como L.Binda e por outros pertencentes ao *Grupo Nazionale per la Difesa dai Terramoti*.

Como material para a elaboração deste tipo de levantamento, utilizou-se, uma maceta e martelo, escopro, escova de aço, fita métrica, óculos de protecção, luvas, máquina fotográfica (14 megapixéis) e tripé.

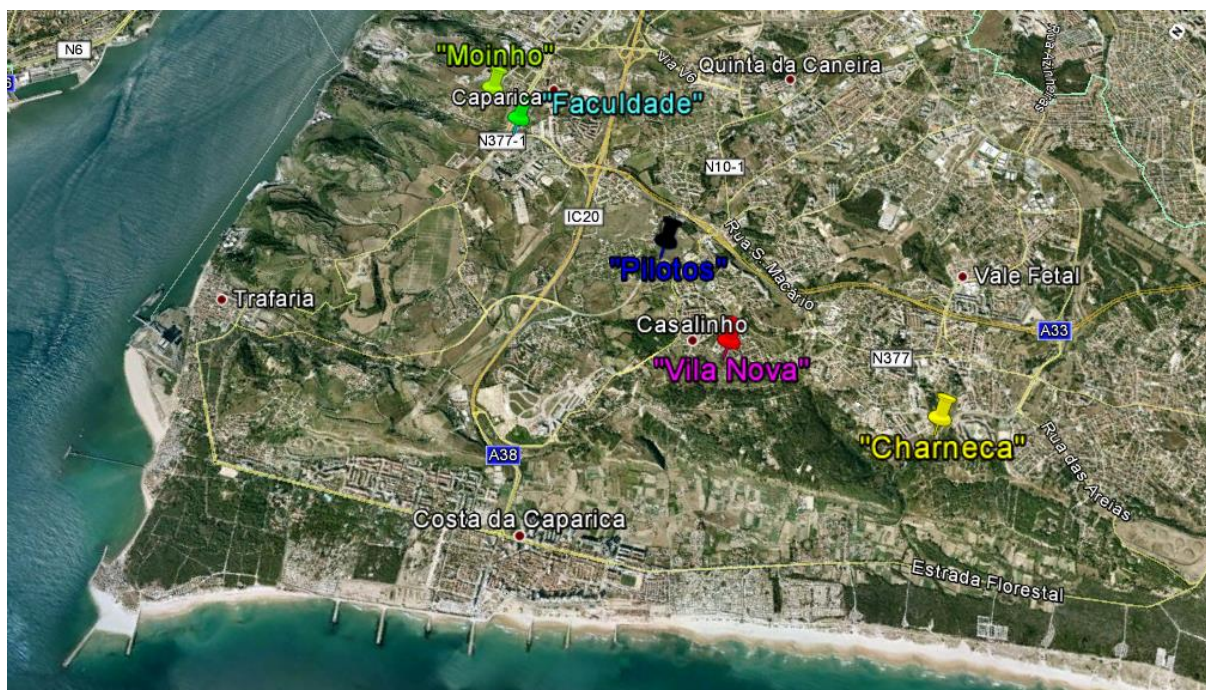


Figura 3.1 – Localização das paredes em estudo

3.1.1. Recolha de amostras

Foram recolhidas duas amostras de material existente nas paredes, de pontos diferentes de cada uma delas, num total de quinze paredes, para que os resultados pudessem ser posteriormente comparados. O ponto 1 localiza-se numa parte mais superior da parede enquanto que o ponto 2 localiza-se numa parte mais em baixo (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Locais da recolha das amostras em cada uma das paredes

Tentou-se que as amostras retiradas das paredes fossem o mais heterogêneas possível de modo a poder-se realizar os ensaios referidos anteriormente. As amostras foram retiradas recorrendo à ajuda de um martelo e escopro para o interior de sacos de plástico, por forma a facilitar o seu transporte e finalmente foram introduzidas em estufa a uma temperatura de cerca de 60 ± 5 °C até atingirem uma massa constante. Considera-se que a massa constante foi atingida quando a variação entre duas pesagens intervaladas de vinte e quatro horas é menor ou igual a 0,1% da massa do provete. Relativamente às amostras recolhidas dos alçados, estas foram apenas submetidas a ensaios de porosidade aberta e massa volúmica, para que fosse possível comparar com os resultados obtidos dos mesmos ensaios mas de amostras retiradas das secções transversais.

3.1.2. Caracterização qualitativa das paredes de alvenaria

A identificação dos materiais existentes nas paredes foi feita através de uma inspecção exhaustiva das diferentes amostras em laboratório.

Para se diferenciar a coesão das argamassas, as amostras foram avaliadas visualmente quanto à cor e também quanto à sua resistência à quebra. Quanto mais claras fossem as amostras, maior a quantidade de ligante (cal aérea) existente e assim, maior o traço correspondente a essa argamassa. Da mesma forma quanto mais fácil fosse a quebra dessa amostra de argamassa, menor a coesão e associando este dado à cor foi possível realizar a identificação qualitativa de todas as argamassas existentes nas paredes de alvenaria.

Posto isto, é de destacar a panóplia de materiais existentes nas paredes de alvenaria, todos eles diferentes de local para local, principalmente as argamassas, cujos traços e composições diferiam sobremaneira, uns com traços mais fracos, outros mais fortes, as quais, até mesmo pertencendo à mesma construção, diferiam em alguns casos.

As pedras encontradas, constituintes principais dos panos de alvenaria, foram pedras sedimentares calcárias e argilosas, dispostas maioritariamente em fiadas e em coluna. Para além destas pedras serem utilizadas nos panos, foram encontradas as mesmas pedras mas de dimensões inferiores, aproximadamente entre 4 mm e 7 cm (seixos), no interior das alvenarias, tendo como função o enchimento juntamente com as argamassas assim como de calços ou cunhas das pedras de maiores dimensões, que constituem os panos. Também é de referir que foi notada a existência de elementos cerâmicos tanto em zonas interiores das alvenarias como, em alguns casos, nos panos.

Em algumas paredes de alvenaria, também foram encontrados grumos de cal nas argamassas (Figura 3.3). Isto explica-se pela realização de uma extinção sem pormenor, ou seja, uma extinção deficiente.



Figura 3.3 – Argamassas de cal aérea com grumos de cal carbonatada

Todos os materiais existentes nas paredes de alvenaria de pedra em estudo, descritos nos parágrafos anteriores são apresentados, em pormenor, nos Quadro 3.1 e 3.2.

Quadro 3.1 – Materiais das paredes de alvenaria

Foto	Designação do material
	<p>-Calcário - Rocha sedimentar calcária com presença de sílicas. É uma rocha milenar bastante densa.</p>
	<p>-Argila – caracterizada por ser uma rocha granular com grãos de dimensões muito reduzidas, de grande coerência e por ser bastante seca. É uma rocha sedimentar menos densa que a rocha calcária.</p> <p>A expansão das argilas dá-se através da absorção de água.</p> <p>Quando têm água em excesso ocorre a sua degradação, perdendo a argila e a sua coesão e originando suspensão de partículas.</p>
	<p>-Argamassa de cal aérea, com agregados de componentes arenosas e adições pozolánicas de pó de tijolo. Argamassa com traço fraco.</p>



Quadro 3.2 – Materiais das paredes de alvenaria

Foto	Designação do material
	<p>-Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas, traço normal e com grumos de cal carbonatada (pontos brancos).</p>
	<p>-Terra argilosa com cal. A terra confere elasticidade e compactidade à parede, contudo a terra concede fragilidade às paredes quando em contacto com água. A terra tem também boas capacidades higrótérmicas, que permitem que haja uma maior permeabilidade ao vapor de água por parte da parede, levando a uma menor ocorrência de condensações resultando num maior conforto higrótérmico no interior.</p>
	<p>-Argamassa de cal aérea, traço forte, com agregados de componentes arenosas, uma vez que apresenta uma cor bastante clara e é mais friável que a argila, desagrega-se mais facilmente. Há também grumos de cal carbonatada (pontos brancos). O tom rosa/vermelho pode ser devido a alguma adição pozolânica de pó de tijolo, ou pelo contacto com materiais cerâmicos, telhas, restos de tijolo, etc.</p>
	<p>-Argamassa de cal aérea, traço forte, com agregados de componentes arenosas pois apresenta uma cor bastante clara e é mais friável que a argila, desagrega-se mais facilmente. Existem grumos de cal carbonatada representada por pontos brancos.</p>
	<p>-Elemento cerâmico (cor alaranjada)</p>



Nos pontos 3.1.2.1 e 3.1.2.2 (Quadro 3.3 a 3.8) mostram-se as localizações das diferentes paredes de alvenaria, tanto secções transversais como alçados, assim como os materiais existentes em cada uma delas e algumas observações relevantes para a avaliação das mesmas. As imagens de cada parede serão apresentadas com mais pormenor no ponto 3.1.3.

3.1.2.1. Secções transversais



Quadro 3.3 – Descrição das paredes da zona “Moinho”

Zona - Moinho					
Foto	Local	Orientação	Dimensão transversal	Materiais	Observações
	Parede A Monte da Caparica 38°40'04.46''N 9°12'08.44''O Elevação – 98m	Sul	130 cm	-Pedras calcárias -Pedras argilosas -Argamassa de cal aérea com adições pozolânicas de pó de tijolo - traço forte -Seixo rolado	-Secção transversal
	Parede B Monte da Caparica 38°40'04.46''N 9°12'08.44''O Elevação – 98m	Sul	151 cm		



Quadro 3.4 - Descrição das paredes da zona “Pilotos”

Zona – Pilotos					
Foto	Local	Orientação	Dimensão transversal	Materiais	Observações
	Parede A Pilotos 38°38'56.36"N 9°12'21.05"O Elevação – 85m	Sul	14cm	-Placas de tijolo cerâmico -Argamassa de cal aérea com adições pozolânicas de pó de tijolo - traço fraco -Madeira para batentes das portas	-Secção transversal
	Parede C Pilotos 38°38'56.36"N 9°12'21.05"O Elevação – 85m	Norte	72cm	-Placas de tijolo cerâmico -Telhas -Argamassa de cal aérea com terra -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas - traço forte -Madeira para batentes das portas (buchas) -Pedras sedimentares argilosas	-Terra preenche os vazios, conferindo compactidade e elasticidade à parede (não tem comportamento rígido face a solicitações mecânicas (sismo)) -Secção transversal


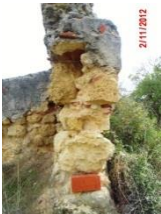


Quadro 3.5 - Descrição das paredes da zona “Vila Nova”

Zona – Vila Nova de Caparica					
Foto	Local	Orientação	Dimensão transversal	Materiais	Observações
	Parede A Vila Nova de Caparica 38°38'28.30"N 9°12'36.73"O Elevação – 94m	Sul	52 cm	-Pedras sedimentares argilosas -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas - traço fraco	-Secção transversal
	Parede B Vila Nova de Caparica 38°38'28.30"N 9°12'36.73"O Elevação – 94m	Norte	52 cm	-Pedras sedimentares argilosas -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas - traço fraco -Existência de grumos de cal carbonatada na argamassa	

Quadro 3.6 - Descrição das paredes da zona “Faculdade”





Zona - Faculdade					
Foto	Local	Orientação	Dimensão transversal	Materiais	Observações
	Parede A Largo da Torre, Monte da Caparica 38°39'48.03"N 9°12'13.84"O Elevação – 100m	Este	90 cm	-Pedras sedimentares calcárias -Pedras sedimentares argilosas -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas - traço médio -Existência de grumos cal carbonatada na argamassa -Placas de tijolo cerâmico -Argamassa cal aérea com agregados de componentes argilosas - traço mais forte	-Secção transversal
	Parede B Largo da Torre, Monte da Caparica 38°39'48.03"N 9°12'13.84"O Elevação – 100m	Sul	65 cm	-Pedras sedimentares calcárias -Pedras sedimentares argilosas -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas – traço médio -Placas de tijolo cerâmico -Existência de grumos de cal carbonatada na argamassa	-Argila – rocha sedimentar com fósseis proveniente da arriba fóssil da Costa da Caparica -Secção transversal

Quadro 3.7 Descrição das paredes da zona “Charneca”

Zona - Charneca					
Foto	Local	Orientação	Dimensão transversal	Materiais	Observações
	Parede A 38°37'36.51'' N 9°12'18.74''O Elevação – 64m	Norte	75 cm	<ul style="list-style-type: none"> -Pedras sedimentares calcárias -Pedras sedimentares argilosas -Dois tipos de argamassa de cal aérea; uma com traço mais forte e outra mais fraca, existindo também tanto agregados de componentes arenosas como argilosas -Placas de tijolo cerâmico 	-Secção transversal
	Parede B 38°37'36.51'' N 9°12'18.74''O Elevação – 64m	Norte	63 cm		
	Parede C 38°37'36.51'' N 9°12'18.74''O Elevação – 64m	Sul	63 cm		
	Parede D 38°37'36.51'' N 9°12'18.74''O Elevação – 64m	Este	63 cm	<ul style="list-style-type: none"> -Pedras sedimentares calcárias -Pedras sedimentares argilosas -Dois tipos de argamassa de cal aérea; uma com traço mais forte e outra mais fraca, existindo também tanto agregados de componentes arenosas como argilosas -Placas de tijolo cerâmico (dimensões: 0,15/0,1/0,03 – c/l/e) 	

3.1.2.2. Alçados

Quadro 3.8 - Descrição das paredes da zona “Pilotos”

Zona – Pilotos					
Foto	Local	Orientação	Dimensão longitudinal	Materiais	Observações
	Parede B Pilotos 38°38'56.36"N 9°12'21.05"O Elevação – 85m	Este	210cm	-Placas de tijolo cerâmico -Telhas -Pedras sedimentares calcárias -Pedras sedimentares argilosas -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas - traço médio -Argamassa de cal aérea com adições pozolânicas de pó de tijolo - traço fraco -Existência de grumos de cal carbonatada na argamassa	-Existência rocha sedimentar com incrustação de fauna marinha e alteração cromática estratificada e bem definida que indicia a presença de cinza vulcânica. -Alçado exterior
	Parede D Pilotos 38°38'56.36"N 9°12'21.05"O Elevação – 85m	Este	285 cm	-Placas de tijolo cerâmico -Telhas -Pedras sedimentares calcárias -Pedras sedimentares argilosas -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas – traço médio	-Não foram retiradas amostras desta parede -Alçado interior
	Parede E Pilotos 38°38'56.36"N 9°12'21.05"O Elevação – 85m	Sul	185 cm	-Placas de tijolo cerâmico -Pedras sedimentares calcárias -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas - traço forte -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas e com adições pozolânicas de pó de tijolo -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas e com adições pozolânicas de pó de tijolo/contacto com materiais cerâmicos	-Alçado exterior
	Parede F Pilotos 38°38'56.36"N 9°12'21.05"O Elevação – 85m	Norte	251 cm	-Placas de tijolo cerâmico -Pedras sedimentares calcárias -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas - traço médio -Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas e com adições pozolânicas de pó de tijolo	-Não foram retiradas amostras desta parede -Alçado exterior

3.1.3. Classificação das paredes de alvenaria estudadas

Neste ponto será realizada a classificação das paredes de alvenaria de pedra estudadas quanto ao seu número de panos (tipo de secção transversal), tipo de conexão entre eles e espessura da parede para as secções transversais e tipo de aparelho e tipo de assentamento para os alçados.

A classificação das paredes quanto ao número de panos e à conexão entre eles foi feita tendo em conta a classificação adoptada em 2001 por L.Binda e estão apresentadas na Figura 2.5. Quanto à classificação dos alçados, esta foi realizada tendo por base as classificações já descritas na Figura 2.6 e 2.7, referentes ao tipo de aparelho e tipo de assentamento.

Nos pontos seguintes, são apresentadas as fotografias das secções transversais e dos alçados em estudo e é feita uma descrição da forma como foi realizada a classificação, tendo em conta as classificações referidas no parágrafo anterior.

3.1.3.1. *Secções transversais*

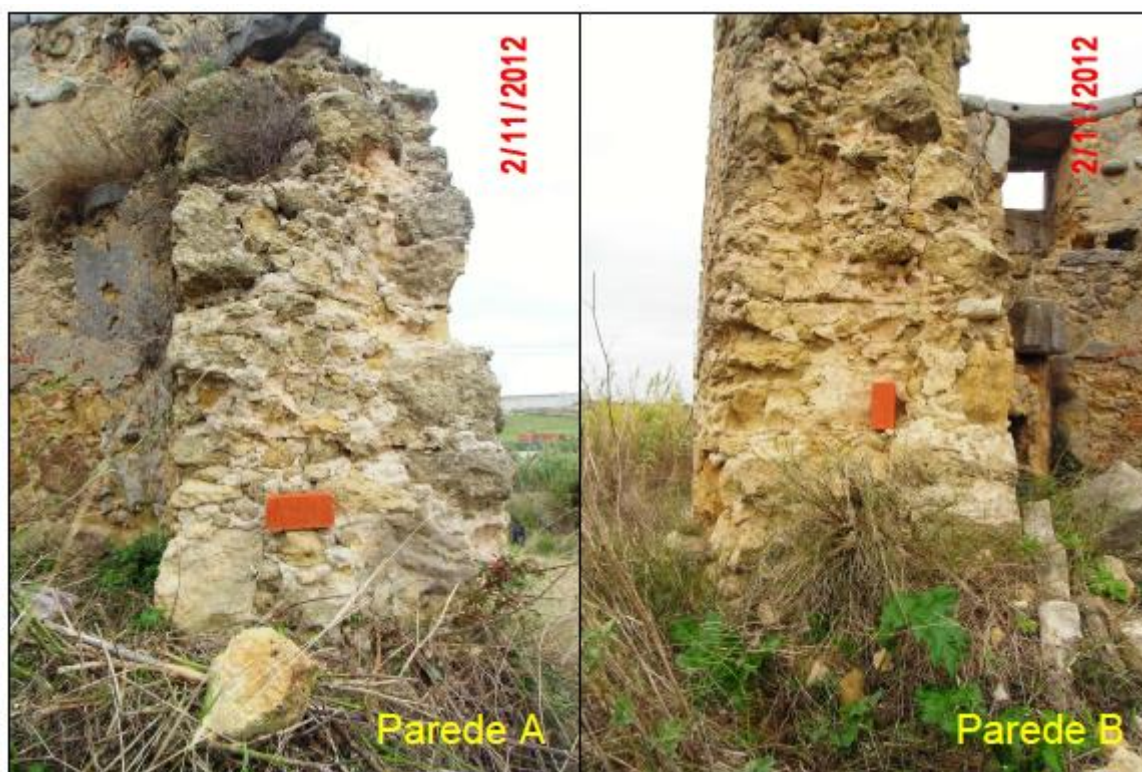


Figura 3.4 – Secções transversais da zona “Moinho”

As paredes de alvenaria da Figura 3.4, existentes na zona “Moinho”, são paredes de três panos, com pano interior espesso. São bem visíveis os três panos, um interior e outro exterior, compostos por uma sequência de pedras na vertical, intercaladas por argamassa, enquanto que o pano intermédio, com uma largura bastante considerável, é composto por uma mistura de argamassa, seixos

rolados e pedras de dimensões menores às existentes nos panos interior e exterior. A construção destas alvenarias tinha uma peculiaridade em relação às restantes em estudo, foram construídas até uma altura de 1,5 metros e só depois foi continuada a restante construção até perfazer a altura total, sendo visível essa linha separadora aos 1,5 metros de altura. As duas paredes da zona “Moinho” apresentadas na Figura 3.4 não apresentavam perpianhos.



Figura 3.5 – Secções transversais da zona “Charneca”

Na Figura 3.5 mostram-se as imagens das paredes da zona “Charneca”. São paredes de pano duplo, com conexão transversal, garantida por pedras compridas de formato regular. É visível nas fotografias que os perpianhos atravessam a largura total da parede por forma a unir os dois panos. Por sua vez, as paredes da zona “Vila Nova” em que as imagens das paredes se mostram na Figura 3.6, são constituídas por pedras de dimensões significativas, aproximadamente a largura da parede em si, especialmente as pedras mais próximas da base, as quais conferem uma maior estabilidade à parede.

Como é característico nas alvenarias, constatou-se nas paredes da zona “Vila Nova” uma alternância entre pedras e argamassa, uma vez que, devido ao formato arredondado ou irregular das

pedras, estas não transmitem tanta estabilidade se não houver a argamassa, a qual serve para um melhor apoio e ligação entre pedras.

Relativamente a elementos cerâmicos, presentes nas alvenarias de pedra, este tipo de material foi encontrado na parede de alvenaria D da zona “Charneca”. Para além do pano simples composto por pedras e argamassa, esta parede apresentava uma camada de elementos cerâmicos na sua face exterior, também intercalados com argamassa, provavelmente como forma de revestimento da alvenaria (Figura 3.5).



Figura 3.6 – Secções transversais da zona “Vila Nova”

Na zona “Faculdade”, Figura 3.7, foram estudadas duas paredes de alvenaria com tipos de construção diferentes. Uma delas classificou-se como parede de um só pano – parede espessa, enquanto que a segunda foi classificada como parede de pano duplo sem conexão. Na primeira, parede A da Figura 3.7, pode-se observar que é uma alvenaria relativamente larga, e com pedras dispostas em toda a sua largura, quase que em forma de camadas. Relativamente à segunda parede (parede B), apresentada na Figura 3.7, é visível a presença de dois panos distintos, interior e exterior, com uma distância mínima entre eles e sem pedras a conectá-los (perpianos ou travadouros).



Figura 3.7 – Secções transversais da zona “Faculdade”


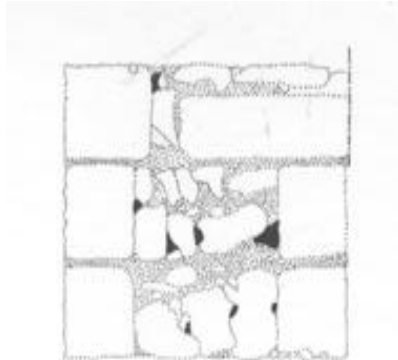

Na zona “Pilotos” (Figura 3.8) foram estudadas duas secções transversais. Começando pela parede A, classificada como parede de pano simples que é composta por elementos cerâmicos assentes em argamassa, intercalando entre si. A argamassa mais uma vez serve como apoio e ligação entre os elementos cerâmicos. A parede C, de forma semelhante à parede de alvenaria D da zona “Charneca” apesar de aparentar ter dois panos, a parte exterior da alvenaria não é nada menos que a ombreira de uma porta, podendo-se até reparar que essa secção da alvenaria está num plano que difere do plano em que a restante parede está inserida. Posto isto, a classificação atribuída a esta parede é de parede de pano simples.




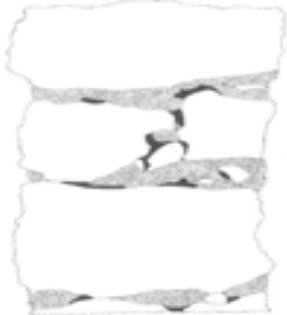

Figura 3.8 – Secções transversais da zona “Pilotos”

De seguida, nos Quadros 3.9 até 3.13, é apresentado um resumo com a classificação quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos das secções transversais em estudo.






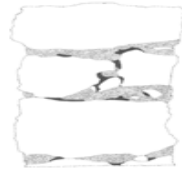
Quadro 3.9 – Classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos

Zona – Moinho		
Foto	Classificação	Imagem de Classificação - Binda (2001)
	Parede de três panos com pano interior espesso	
		





Quadro 3.10 - Classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos

Zona – Vila Nova		
Foto	Classificação	Imagem de Classificação - Binda (2001)
	Parede de um pano Pano Simples	
		




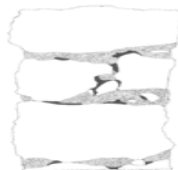
Quadro 3.11 - Classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos

Zona - Charneca		
Foto	Classificação	Imagem de Classificação – Binda (2001)
	<p>Pano duplo com conexão transversal garantida por pedras compridas de formato regular (perpianhos)</p>	
		
		
	<p>Parede de um pano</p> <p>Pano Simples</p>	

Quadro 3.12 - Classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos

Zona - Faculdade		
Foto	Classificação	Imagem de Classificação - Binda (2001)
	<p>Parede de um pano</p> <p>Parede espessa</p>	
	<p>Parede de pano duplo sem conexão</p>	

Quadro 3.13 - Classificação das paredes quanto ao número de panos e tipo de conexão entre panos

Zona – Pilotos		
Foto	Classificação	Imagem de Classificação - Binda (2001)
	Parede de um pano Pano Simples	
	Parede de um pano Pano Simples	

3.1.3.2. Alçados

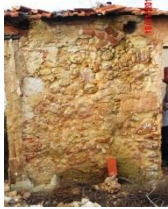
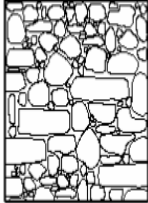
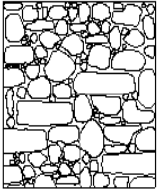




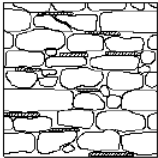


Figura 3.9 – Alçados da zona “Pilotos”

Relativamente às paredes B, D, E e F da zona “Pilotos” (Figura 3.9), estas têm a particularidade de serem alçados. Diferindo, deste modo, das restantes secções transversais em estudo, a classificação destes também é diferente. Os alçados foram classificadas quanto ao tipo de assentamento e ao tipo de aparelho. Assim sendo, pode-se afirmar que as paredes B, D e E apresentam um tipo de assentamento aleatório, ao contrário da parede F a qual apresenta um tipo de assentamento com calços e cunhas. Relativamente ao tipo de aparelho pode-se constatar através da Figura 3.9 que as paredes B, D e E apresentam juntas desalinhadas, enquanto a parede F, apresenta juntas irregulares alinhadas.

De seguida, no Quadro 3.14, é apresentado o resumo da classificação realizada aos alçados referente ao tipo de assentamento e ao tipo de aparelho:

Quadro 3.14 – Classificação das paredes quanto ao assentamento das fiadas e ao tipo de aparelho

Zona – Pilotos				
Foto	Tipo de aparelho	Tipo de assentamento	Imagem de classificação de referência	
	Juntas desalinhadas	Aleatório	 Juntas Desalinhadas	 Aleatório
				
				
	Juntas irregulares alinhadas	Com calços e cunhas	 Juntas Irregulares Alinhadas	 Com calços e cunhas

3.1.4. Caracterização das paredes de alvenaria através de fotografias da secção transversal e do alçado

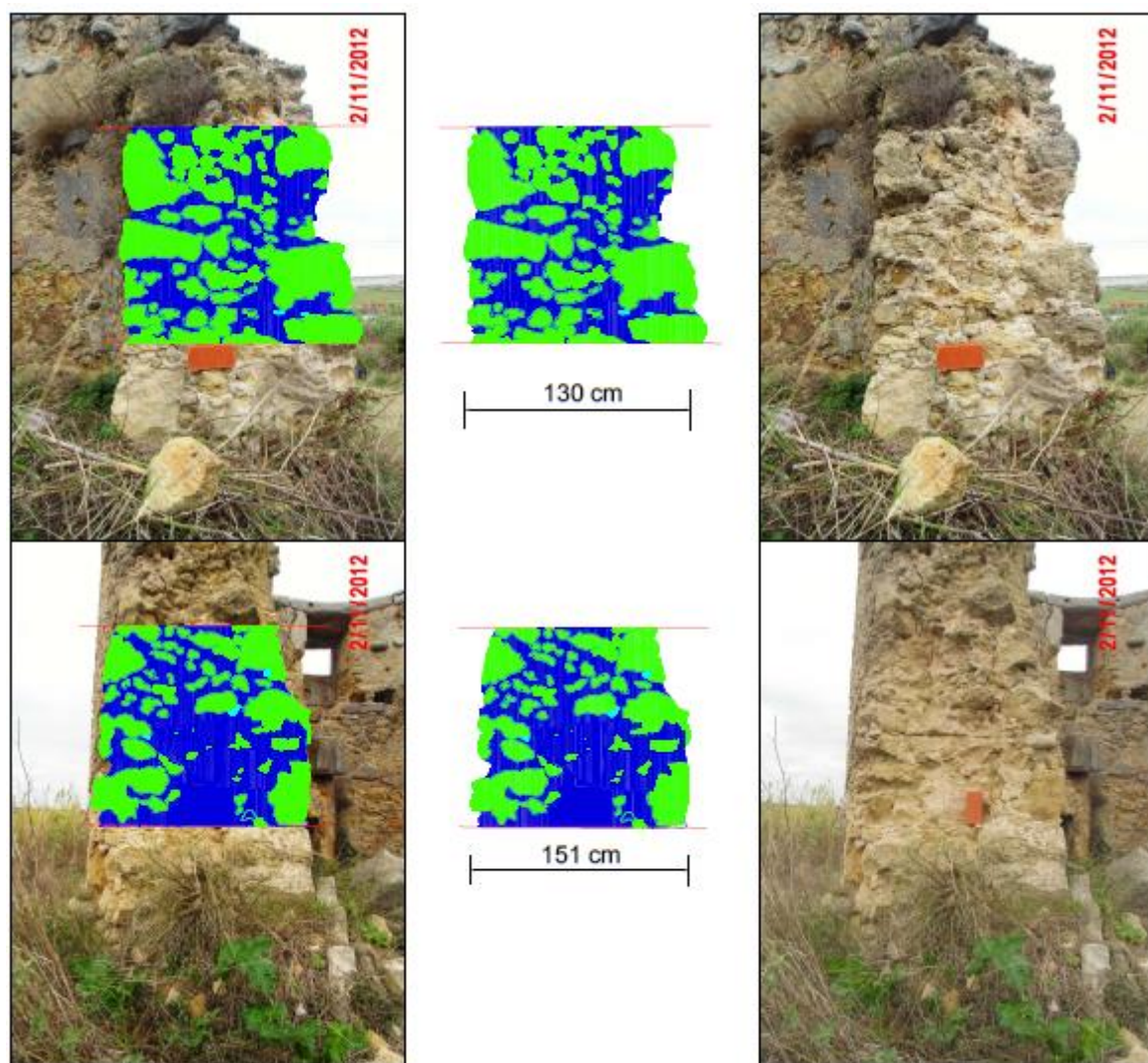
A caracterização das paredes de alvenaria de pedra requer um estudo rigoroso da geometria (secção transversal e alçado) e dos restantes elementos constituintes da parede. A composição das paredes foi estudada, tendo também sido calculadas as áreas em percentagem e características gerais dos constituintes da parede (pedras, argamassa, vazios e outros).

No intuito de proceder à caracterização das paredes de alvenaria de pedra, fez-se a quantificação, em percentagem, dos materiais existentes de todas as secções transversais e alçados das paredes em estudo. Para a realização desta quantificação dos materiais, foram tiradas fotografias (já mostradas no ponto anterior) às secções das alvenarias em estudo, com a máquina o mais possível paralela à parede, centrada relativamente à altura e largura das paredes e sempre com um objecto a servir de referência para a escala (neste caso foi utilizado um tijolo maciço de 11). Ao tirarem-se as fotografias foi tido sempre em conta que as mesmas deviam ter qualidade suficiente para que fosse possível identificar os diferentes tipos de materiais e as suas fronteiras. De seguida, as fotografias foram analisadas na ferramenta de desenho computacional *Autocad 2013* e retiradas as áreas de cada um dos materiais, incluindo os vazios.

Para isto e para a realização da discretização dos materiais das paredes de alvenaria no programa *Autocad*, depois de se ter posto as fotos à escala pretendida, foram utilizados vários comandos, sendo os de maior importância as “*polyline*”, “*boundary*”, “*hatch*”, para além de se ter criado diferentes “*layers*” para cada um dos materiais: azul claro (130) para os vazios, azul escuro (172) para a argamassa, verde (80) para as pedras, castanho (36) para a madeira, azul acinzentado (171) para o reboco e laranja (21) para elementos cerâmicos. O comando “*polyline*” foi utilizado para fazer a delimitação (contornos) dos elementos da parede, criando assim linhas fechadas contornando os diferentes materiais e nas quais foram utilizadas o comando “*hatch*” que concede um fundo padronizado, tornando-se mais fácil a identificação de cada material diferente. O comando “*boundary*” foi utilizado para definir limites em zonas que se pretendia utilizar o comando “*hatch*”, tornando zonas que não eram fechadas, em zonas fechadas.

3.1.4.1. Secções transversais

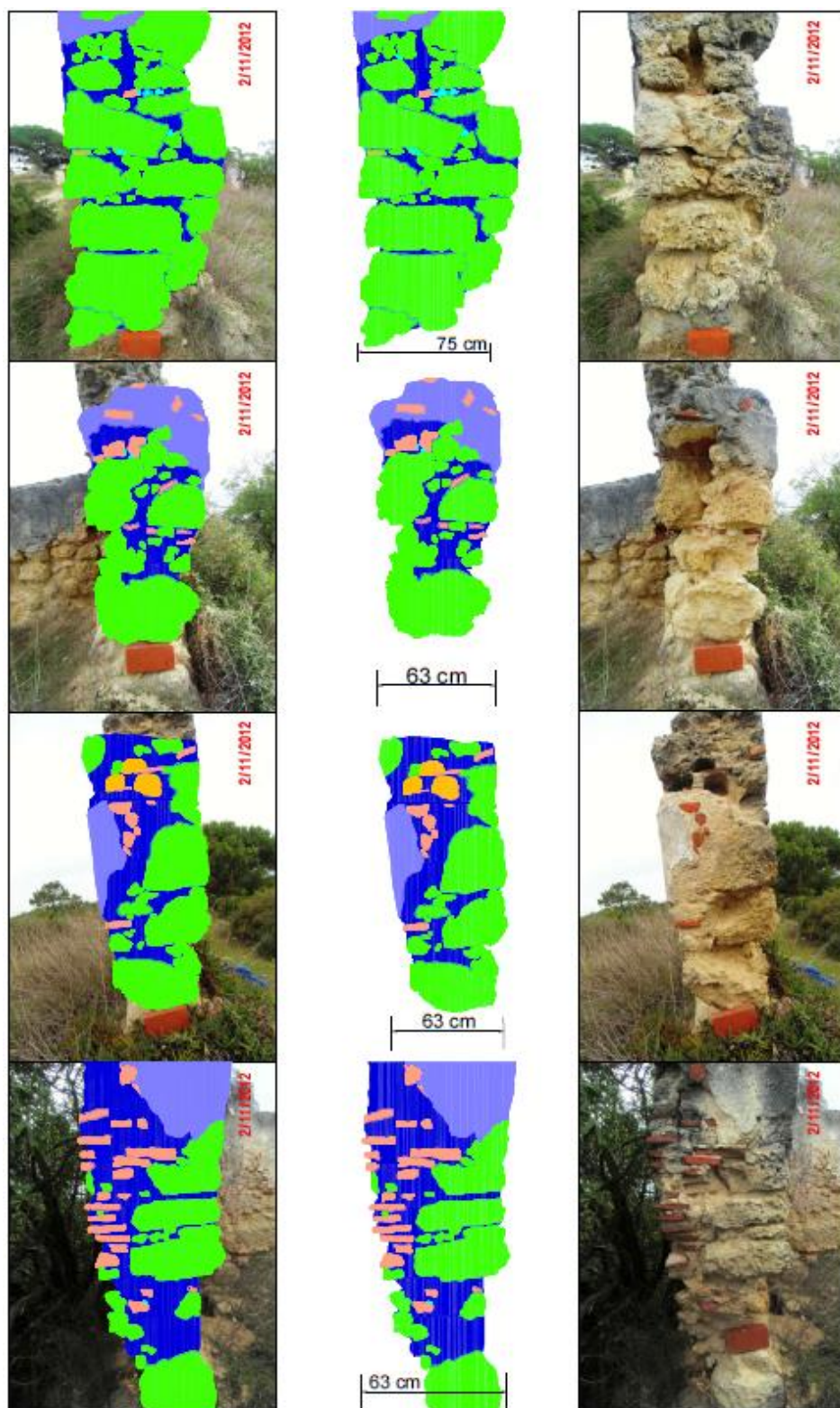
Nas Figura 3.10 até Figura 3.14 é apresentado o trabalho de caracterização das secções transversais das paredes de alvenaria de pedra em estudo.



Legenda:

Pedra	■
Argamassa	■
Vazios	■
Reboco	■
Elementos cerâmicos	■
Madeira	■
Delimitação parede estudada	■

Figura 3.10 – Esquemas das secções transversais da zona “Moinho”



Legenda:

Pedra	■
Argamassa	■
Vazios	■
Reboco	■
Elementos cerâmicos	■
Madeira	■
Delimitação parede estudada	■

Figura 3.11 - Esquemas das secções transversais da zona “Charneca”

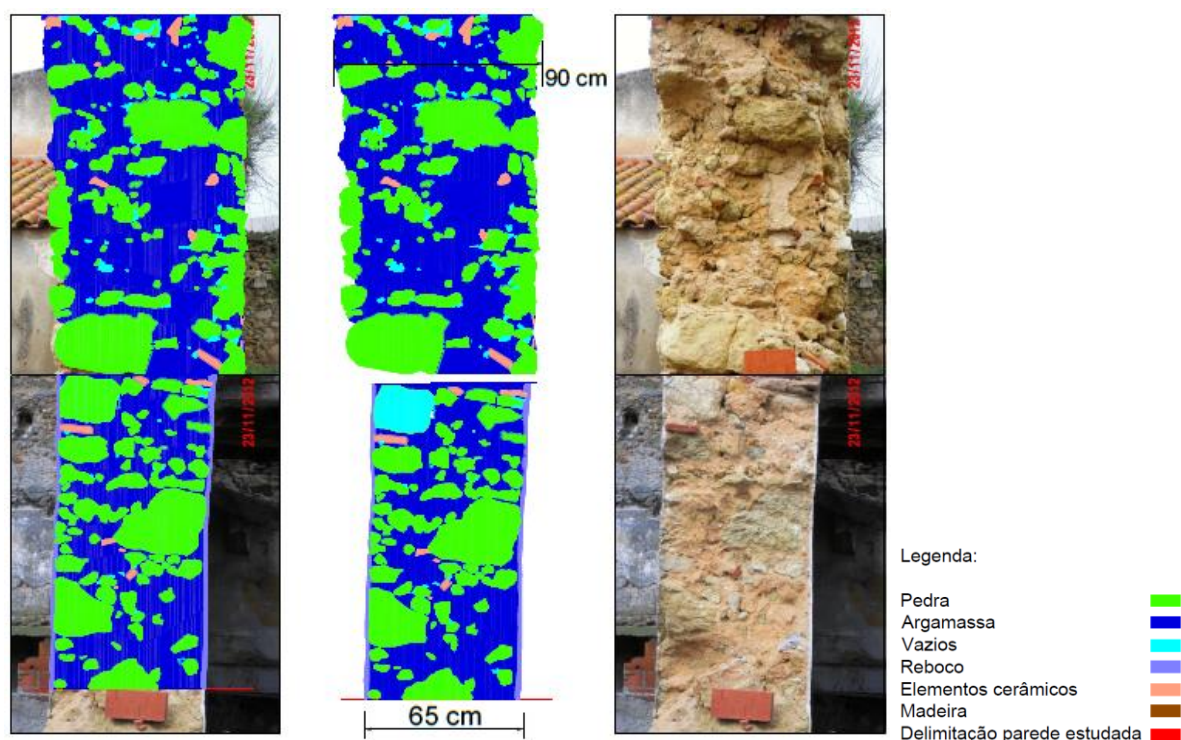


Figura 3.12 - Esquemas das secções transversais da zona “Faculdade”

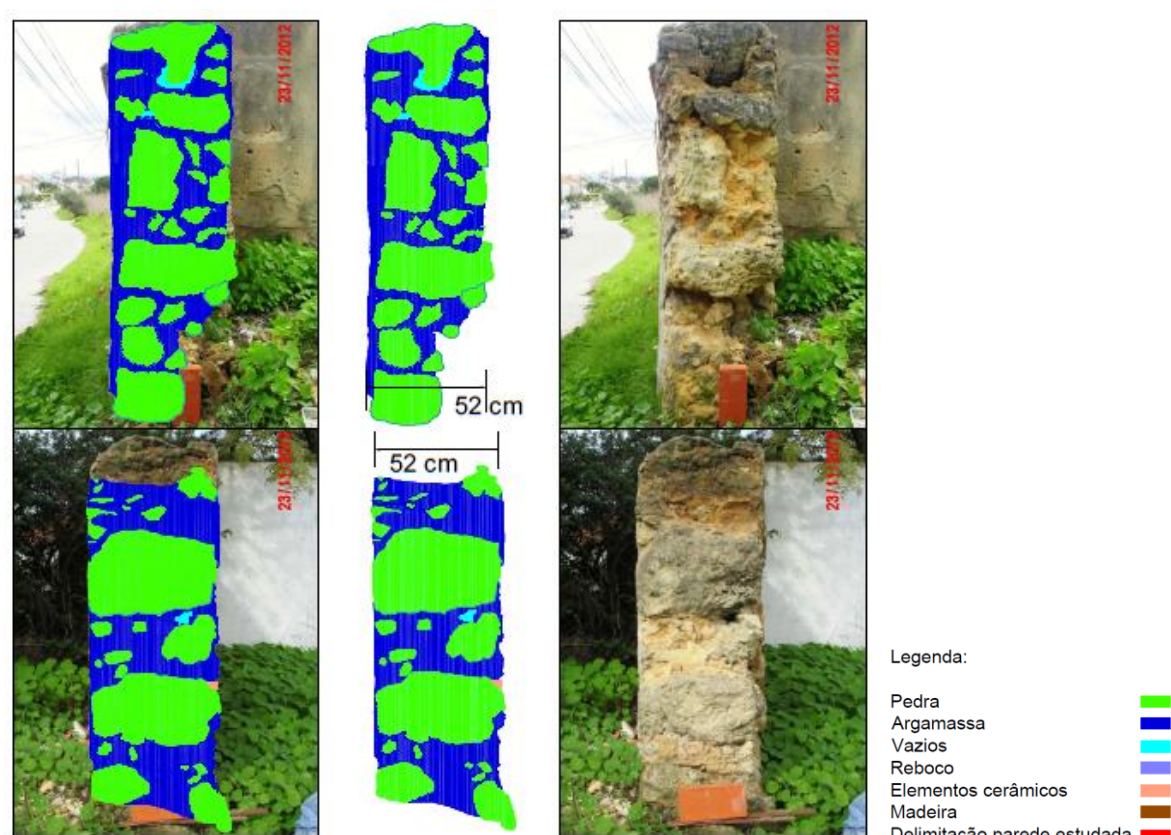


Figura 3.13 - Esquemas das secções transversais da zona “Vila Nova”

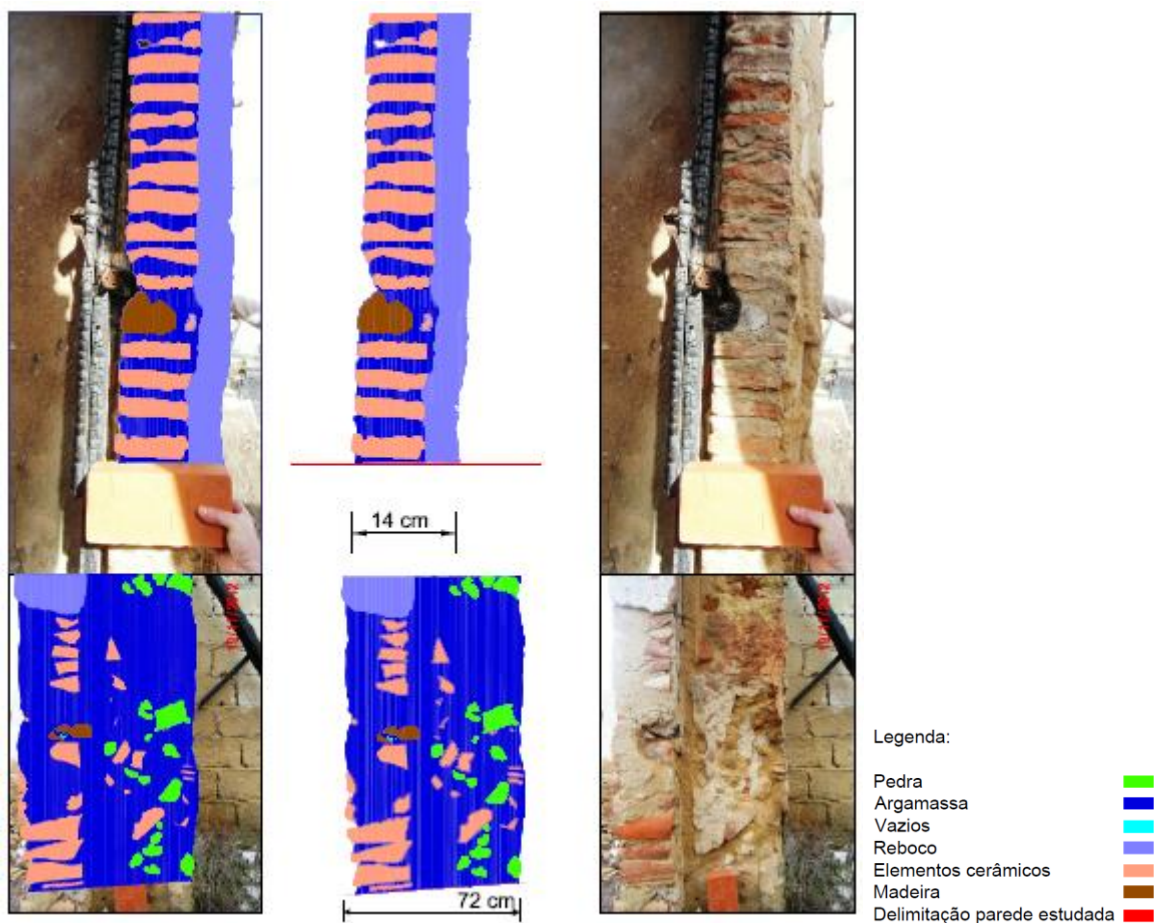


Figura 3.14 - Esquemas das secções transversais da zona “Pilotos”

3.1.4.2. Alçados

Na Figura 3.15 é apresentado o trabalho de caracterização dos alçados das paredes de alvenaria de pedra em estudo.

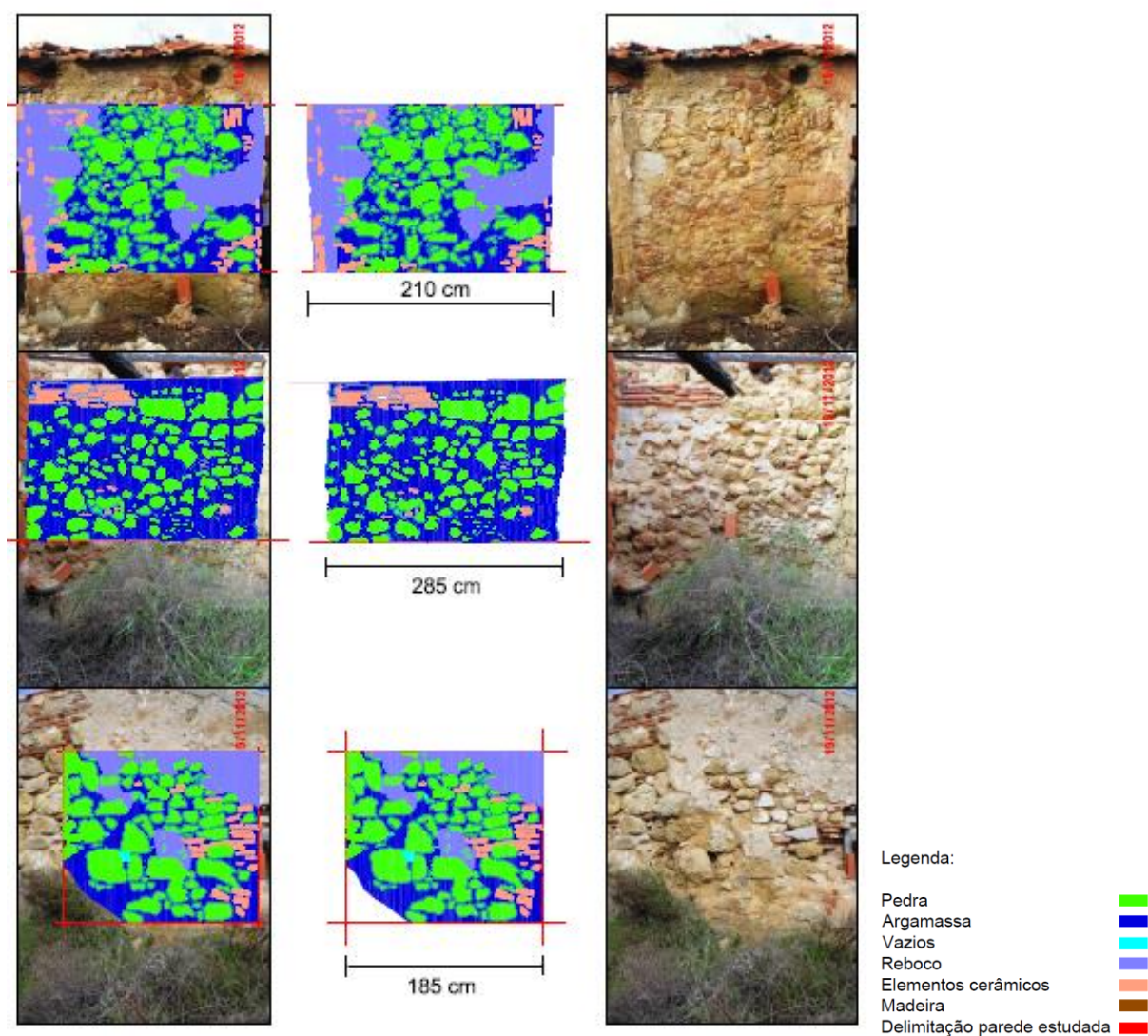


Figura 3.15 - Esquemas dos alçados da zona “Pilotos”

3.1.5. Análise granulométrica

Uma vez que as argamassas são materiais compostos maioritariamente por ligante e agregado e um dos objectivos deste trabalho é avaliar o comportamento das referidas argamassas nas alvenarias antigas, foi estudada a granulometria dos agregados das mesmas. O princípio para a composição e dosagem de uma argamassa com base na curva granulométrica está em obter uma argamassa trabalhável no estado fresco e que possua, no estado endurecido, uma compacidade elevada, com redução do volume de vazios e com capacidade de deformação.

O ensaio com a finalidade de traçar a curva granulométrica foi realizado utilizando um agitador de peneiros (Figura 3.16) e amostras de quantidades aproximadas entre si (aproximadamente 800g) para que pudessem ser realizadas comparações posteriores. As amostras de argamassa utilizadas neste ensaio foram provenientes unicamente do centro das secções transversais das alvenarias em estudo. Para a realização deste ensaio foram usadas duas séries de peneiros distintos, a primeira com uma série de malha mais grossa e com uma peneiração de duração de 15 minutos e a segunda com uma malha mais fina, também com uma duração de 15 minutos. Dentro dos peneiros da série mais fina, foi colocada uma esfera metálica de pequenas dimensões para que as partículas fossem separadas mais minuciosamente. Também na segunda série os 15 minutos totais de vibração foram divididos em 8 minutos iniciais, 1 minuto de pausa, de modo a que as partículas mais finas existentes em suspensão nos peneiros conseguissem ter tempo e possibilidade para assentar e poderem passar pelas malhas e por fim os últimos 7 minutos. As amostras antes de serem utilizadas neste ensaio foram previamente secas em estufa a uma temperatura de 60 ± 5 °C.

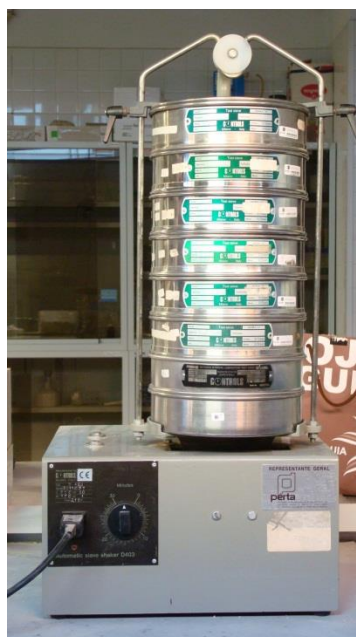


Figura 3.16 – Agitador mecânico de peneiros

Após o término do período de peneiração, o material retido em cada peneiro foi pesado numa balança digital (Figura 3.17) e posteriormente com esses valores, foram traçadas as curvas granulométricas referentes a cada um dos pontos de cada parede. Deve-se referir que os resultados obtidos através deste ensaio dependem da dimensão da amostra.



Figura 3.17 – Balança digital

3.1.6. Porosidade aberta e massa volúmica

As alvenarias estão sujeitas a vários e diferentes géneros de deteriorações, e quando isto acontece a deterioração não se faz de uma forma uniforme. Para contrariar essa deterioração, deve ser feita uma manutenção regular dessas estruturas, de uma forma consciente e eficiente e por isso deve haver um conhecimento das características dos materiais e suas compatibilidades entre si. Deve-se ter sempre em conta que a porosidade é um factor muito importante no comportamento das argamassas e pedras porque esta influencia as características das mesmas na:

- resistência mecânica
- permeabilidade ao vapor de água
- absorção de água por capilaridade
- resistência ao gelo/degelo
- susceptibilidade a deformações
- durabilidade [42].

Tendo isso em conta, foram realizados alguns testes, em laboratório, para se calcular a massa volúmica e a porosidade dos materiais constituintes das paredes de alvenaria.

Neste ensaio, foram utilizadas amostras de todos os tipos de materiais recolhidos (pedras, argamassas e elementos cerâmicos). Para cada material foram feitas três amostras diferentes (Figura 3.18) para que os resultados pudessem ser o mais próximo possível da realidade e prevenir eventuais erros. As amostras foram limpas e colocadas em redes, para o caso das amostras de material friável, não perderem massa durante o ensaio. Registe-se que todas as amostras foram pesadas antes do ensaio (massa seca).



Figura 3.18 – Amostras utilizadas no ensaio de porosidade aberta

O ensaio teve a duração de quatro dias. No primeiro dia as amostras foram colocadas no exsiccador em vácuo com auxílio de uma bomba. No segundo dia foi adicionada água até as amostras ficarem totalmente imersas, continuando em vácuo (Figura 3.19). No terceiro dia retiraram-se as amostras do vácuo, deixando-se que estas continuassem imersas em água. Por fim no quarto dia as amostras foram retiradas da água e realizaram-se medições da massa das amostras, nomeadamente a massa em imersão (pesagem hidrostática) e de seguida a massa saturada, tendo as amostras sido limpas com um pano húmido antes dessa pesagem.

Durante o ensaio, desde a colocação dos provetes no interior do exsiccador até à imersão, o ambiente interior do exsiccador está sujeito a uma acção de sucção do ar provocada por uma bomba, diminuindo gradualmente a pressão até 2667 Pa [22], de modo a que o ar no interior dos poros da argamassa seja maioritariamente retirado, e seja, nestes, facilitada a entrada de água. Estes ensaios foram realizados segundo as indicações da ficha de ensaio Fe 02 e Fe 01 (DEC / UNL), as quais indicam o modo de determinar a porosidade aberta e massa volúmica, real e aparente de corpos sólidos usando o método da pesagem hidrostática [22] [21].



Figura 3.19 – Ensaio de porosidade aberta

De salientar que a água utilizada neste ensaio foi a da rede pública, que as amostras antes de serem utilizadas no ensaio, foram acondicionadas numa estufa ventilada a uma temperatura de 60 ± 5 °C até atingirem massa constante e que as amostras antes de utilizadas no ensaio foram retiradas, da estufa, e colocadas num recipiente com sílica-gel até atingirem a temperatura ambiente. Considera-se que a massa constante foi atingida quando a variação entre duas pesagens intervaladas de vinte e quatro horas é menor ou igual a 0,1% da massa do provete. De notar também que os resultados obtidos através deste ensaio dependem da dimensão da amostra.

A massa volúmica aparente e a porosidade aberta foram calculadas recorrendo às seguintes expressões e são expressas em kg/m^{3+} :

$$mv = \frac{m1}{m3-m2} \times 1000 \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$pa = \frac{m3-m1}{m3-m2} \times 100 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Sendo $m1$ – a massa seca do provete; $m2$ – a massa do provete em pesagem hidrostática; $m3$ – massa saturada do provete [22] [21].

3.1.7. Porometria

Uma matriz sólida com espaços vazios no seu interior, interligados ou não, é um material poroso. O ar que se verifica nesses materiais pode resultar de várias causas, pode ter origem na sua formação, no caso das pedras, enquanto que nas argamassas os vazios ou porosidade se podem dever aos métodos de execução ou à forma de aplicação dos materiais.

Assim sendo, o conhecimento das características dos poros de um determinado material, como volume e tamanho, é de extrema importância para o fabrico, aplicação e conservação desses materiais [28].

De acordo com a maioria dos autores, existem três tipos de poros relativamente às suas dimensões. Contudo, esta classificação quanto à dimensão dos poros é feita de formas diferentes por cada um dos autores, os quais adoptam uma gama de valores para cada um dos grupos consoante o fenómeno em estudo. Para o corrente estudo será tida em conta a classificação da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC).

- microporos, com diâmetros inferiores a 0,002 μm
- mesoporos, com diâmetros de 0,002 a 0,05 μm
- macroporos, com diâmetros superiores a 0,05 μm

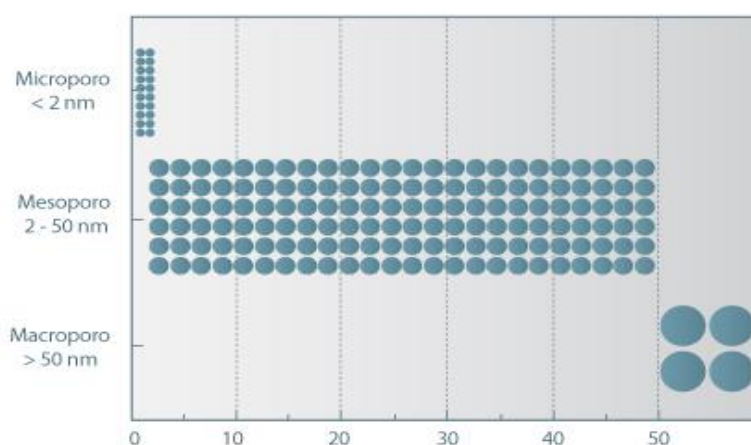


Figura 3.20 – Classificação do tamanho do poro de acordo com a IUPAC – União Internacional de Química Pura e Aplicada [31]

Os microporos são os poros que se encontram em menor percentagem, têm menor influência no comportamento das argamassas e contribuem para a maioria da área superficial que proporciona alta capacidade de adsorção (adesão de moléculas de um fluido a uma superfície sólida) para moléculas de pequenas dimensões. Os mesoporos são importantes para a adsorção de moléculas de grandes dimensões e encontram-se em maior quantidade. Por sua vez, os macroporos aparecem nas argamassas com ligantes aéreos em maior quantidade e normalmente não têm importância na adsorção [31], tendo origem em diversos factores como:

- tipo de ligante
- tipo e quantidade do agregado
- relação água/ligante
- ar aprisionado na mistura
- introdutor de ar, se for o caso do uso do mesmo [38] [17] [4].

O volume de poros total de um material pode ser determinado através da medida simples da densidade, desde que se conheça a densidade do sólido e a geometria do corpo [28]. Deste modo, para

proceder-se à determinação do tamanho e distribuição dos poros nos diferentes materiais existentes nas paredes de alvenaria de pedra, foi utilizado o método de porometria por intrusão de mercúrio. O mercúrio, metal líquido à temperatura ambiente, uma vez que se comporta maioritariamente como um inerte quimicamente, e também como um líquido não molhante em relação ao material sólido, só consegue penetrar materiais sólidos com a ajuda de pressão [36]. Para se poder proceder ao ensaio, as amostras sólidas foram retiradas da estufa, onde estavam armazenadas até estarem secas e atingirem massa constante, colocadas num recipiente com sílica-gel até atingirem a temperatura ambiente e de seguida foram preparadas de modo a poderem ser introduzidas no recipiente do penetrómetro com volume de $7,3087 \text{ cm}^3$ (Figura 3.21). Foram ensaiadas amostras de pedra sedimentar calcária, pedra sedimentar argilosa, argamassa de cal aérea com adições pozolânicas, argamassa de cal aérea com traço mais fraco, argamassa de cal aérea com traço mais forte e elemento cerâmico.



Figura 3.21 – Amostras dos materiais utilizados no ensaio de porometria por intrusão de mercúrio

O método referido consiste na medição do volume de mercúrio introduzido, método este que começa por uma redução da pressão no penetrómetro até $50 \text{ } \mu\text{mHg}$ ($6,7 \times 10^{-6} \text{ MPa}$) após colocação do penetrómetro com a amostra na respectiva porta e de seguida começa a introdução de mercúrio até preencher totalmente a cápsula e a haste do penetrómetro, processo este chamado de intrusão. De seguida existe um aumento gradual da pressão que faz com que o mercúrio existente no penetrómetro seja introduzido na estrutura porosa da amostra. A introdução do mercúrio pode ser dividida em duas fases, uma delas em que é realizada a introdução a baixas pressões e a outra em que são utilizadas altas pressões para essa introdução. Depois do término da fase de introdução de mercúrio, quer a baixas quer a altas pressões, esta desce até atingir-se a pressão atmosférica, fenómeno denominado por extrusão. A intrusão e extrusão de mercúrio, tanto no procedimento de baixa pressão como no de alta pressão, são compreendidas por vários patamares de pressão. Em cada patamar de pressão, há um

tempo de espera de 30 segundos para a fase de altas pressões e de 15 segundos para a fase de baixas pressões. Passado o tempo de espera o aparelho regista o volume de mercúrio introduzido [42].

De seguida são apresentados alguns valores de referência do instrumento utilizado:

- Distribuição de tamanho de poro: 360 – 0,005 μm
- Baixa pressão: até 50 psia (345 kPa); Distribuição de tamanho de poro: 360 – 3,6 μm
- Pressão alta: até 33000 psia (228 MPa); Distribuição de tamanho de poro: 6 – 0,005 μm
- Precisão do transdutor: $\pm 0,1 \%$ da escala completa [37].

É de notar que as dimensões de poros cujos canais de acesso são mais estreitos que as dimensões dos próprios poros, como mostra a Figura 3.22 não são possíveis de detectar [26]. Esta ocorrência, normal em argamassas, implica que o mercúrio introduzido nos poros de maiores dimensões, passe primeiramente nos poros de dimensões mais reduzidas e que se encontram mais perto da superfície. Sabendo que a pressão necessária para introduzir o mercúrio nos poros mais pequenos é superior à que seria exigida para poros de dimensões maiores, estes (poros de dimensões maiores) são representados como tendo uma dimensão equivalente aos poros menores. Assim sendo, os valores apresentados pelo porosímetro são subvalorizados em relação à realidade [42]. Para além disso deve-se referir que os resultados obtidos através deste ensaio dependem da dimensão da amostra.

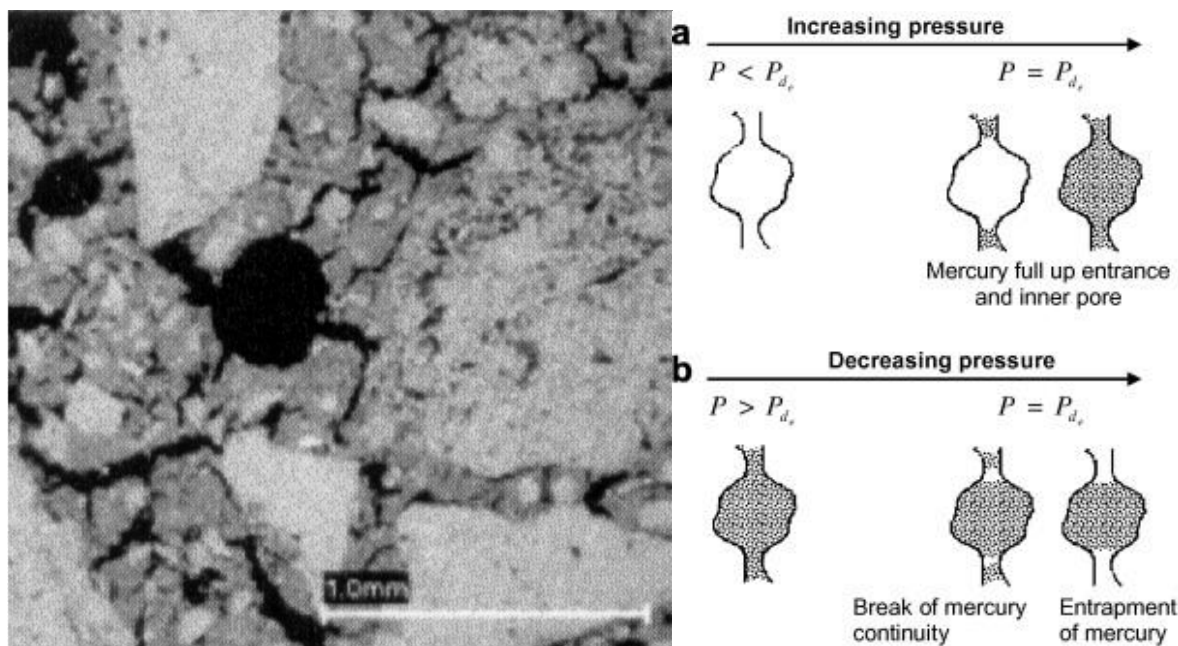


Figura 3.22 – Distribuição de poros de dimensões muito variadas de uma argamassa com cal – Imagem obtida através de um *Scanning electron microscope* [42] (esquerda) e Esquema representativo da intrusão e extrusão do mercúrio em casos de poros de dimensões maiores que os canais de acesso a estes (direita) [19]

Uma vez que o volume de mercúrio introduzido nas amostras é dependente da pressão, podem ser traçadas curvas com os equivalentes tamanhos dos poros. Estas curvas podem ser apresentadas como curvas cumulativas ou incrementais de introdução de mercúrio em função do tamanho dos poros existentes [36].

O princípio de funcionamento de um porosímetro consiste na medida do volume penetrado de mercúrio (líquido não molhante) para valores de pressão sucessivamente crescentes até esta estabilizar (COUTINHO, 1999).

Conhecendo para cada valor da pressão (p), o valor mínimo do diâmetro (d) do poro penetrado pelo mercúrio, o diâmetro dos poros é dado pela equação de Washburn [40]:

$$d = \frac{-4\delta\cos\theta}{p} \quad (\text{Equação 3.3})$$

em que:

θ - o ângulo de contacto do menisco de mercúrio com o material em causa

δ - tensão superficial.

É necessário destacar que o mercúrio é um material volátil e tóxico e deve ser manuseado de uma forma bastante cuidadosa obedecendo às normas de segurança para esse tipo de material [28] e que o aparelho utilizado para este ensaio foi o porosímetro de mercúrio *Autopore IV 9500* (Figura 3.23).



Figura 3.23 - Porosímetro de mercúrio modelo *Autopore IV 9500*

3.1.8. Análise termo gravimétrica

A análise termo gravimétrica (TGA) mede a variação de massa de um material em função do tempo a uma determinada temperatura ou ao longo de um intervalo de temperatura com taxa de aquecimento pré-determinado. A máquina que realiza esta análise consiste, basicamente, numa balança rodeada por uma fonte de aquecimento (forno eléctrico) e por um computador que regista o ganho ou perda de massa do material [41]. As variações de massa que ocorrem durante o aquecimento são, geralmente, causadas pela libertação e remoção de substâncias no estado gasoso a partir de sólidos, e estes fenómenos são quase sempre irreversíveis, em particular, em sistemas abertos.

As únicas mudanças de massa que se podem esperar, do arrefecimento de um material, são as causadas pela absorção de substâncias gasosas (oxigénio, dióxido de carbono e vapor de água) da atmosfera ambiente [33].

A massa da amostra em estudo é traçado em gráficos em função do tempo para estudos isotérmicos e em função da temperatura, nas experiências com uma taxa de aquecimento constante. Assim sendo, esta técnica é sobremaneira útil na monitorização da estabilidade térmica e da perda de certos componentes tais como óleos, plastificantes ou polímeros [41].

A análise termo gravimétrica é também bastante utilizada tanto em estudos de mecanismos de degradação como na previsão do tempo de vida dos materiais.

O instrumento utilizado para a realização deste estudo foi uma termo balança Netzschsta 449 F3 Jupiter (Figura 3.24), a qual para além de fornecer gráficos de curvas termo gravimétricas, também apresenta curvas da respectiva derivada. A derivada da curva termo gravimétrica mostra a derivada da variação de massa da amostra com o tempo e é registada em função do tempo ou da temperatura [6].



Figura 3.24–Termo balança Netzschsta 449 F3 Jupiter

A curva de derivada termo gravimétrica apresenta a mesma informação que a curva termo gravimétrica mas de forma mais clara, permite a leitura rápida da temperatura à qual a velocidade de perda de massa é máxima (Tmax), permite a observação da área sob a curva, a qual é directamente proporcional à variação de massa e permite determinar através da altura do pico da curva da derivada termo gravimétrica, a qualquer temperatura, a fracção de massa que já sofreu transformação [29].

Depois das amostras permanecerem numa estufa a 60 ± 5 °C até atingirem uma massa constante, foram retiradas da estufa, e destas moeu-se com o auxílio de um pilão e de um almofariz cerâmicos, cerca de 2g de uma parte de cada amostra de argamassa a ser estudada, de modo a obter-se um pó fino, após o que se procedeu ao ensaio na termo balança.

O uso de pequenas quantidades de amostra finamente moída facilita o fluxo de calor e a remoção dos produtos de reacção, tornando as perdas de massa mais evidentes, isto é, as secções descendentes das curvas mais definidas. Para amostras onde não ocorram muitas reacções concorrentes ou consecutivas numa gama estreita de temperaturas, obtêm-se termogramas com patamares e secções descendentes bem definidos. Estes constituem a base para o cálculo de dados quantitativos sobre a composição de uma amostra [33]. De salientar que os resultados obtidos através deste ensaio dependem da dimensão da amostra.

O ensaio iniciou-se sob uma temperatura de 26,35 °C e foi realizado a uma velocidade uniforme, subindo a temperatura a cada 15 segundos, até ser atingido a temperatura final de 1198,26°C.

No âmbito deste trabalho, usou-se a análise termo gravimétrica para obter dados quantitativos sobre a composição de duas argamassas diferentes, uma com pontos brancos referente a grumos cal carbonatada e outra sem os ditos grumos, em particular relativamente ao composto carbonato de cálcio (CaCO_3).

3.1.9. Determinação da profundidade de carbonatação

A carbonatação é um fenómeno químico e físico no qual, a partir da reacção de gases, presentes na atmosfera, com os produtos alcalinos das argamassas, provenientes da reacção de hidratação destas, ocorre a formação de compostos com pH inferior a 9. Gases como o gás sulfídrico (H_2S), o dióxido de enxofre (SO_2) e o dióxido de carbono (CO_2) podem levar à carbonatação das argamassas [32].

Durante a reacção de carbonatação são consumidos os compostos essencialmente alcalinos da pasta hidratada da argamassa como por exemplo o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Esta reacção traduz-se pela seguinte equação:



A velocidade com que se dá esta reacção de carbonatação, mais concretamente a velocidade de penetração da frente de carbonatação, é influenciada por diversos factores. Estes factores estão relacionados com as características da argamassa e com as condições de exposição desta, tais como:

- temperatura
- humidade relativa
- composição química do ligante
- composição global da argamassa
- permeabilidade da argamassa
- concentração de CO₂ na atmosfera [32].

A verificação da carbonatação das amostras em estudo, mais precisamente das argamassas das paredes de alvenaria, foi realizada de acordo com a Fe 28 (DEC/UNL) através da aspersão de uma solução alcoólica de fenolftaleína (indicador químico do Ph), após limpeza e secagem dessas amostras num ambiente atmosférico caracterizado por 23 ± 2 °C de temperatura e 60 ± 5 % de humidade relativa [23]. Para além das argamassas em estudo, foram também ensaiadas uma amostra de argamassa de cimento e uma amostra de cal recente, como referência. A grande vantagem da aplicação de fenolftaleína, para além da sua facilidade, rapidez e baixo custo de execução, é que o seu ponto de viragem de coloração coincide com os valores de pH para os quais se considera que a carbonatação ocorre. Uma argamassa não carbonatada, tem um Ph na ordem dos 12 – 13 e à medida que vai acontecendo a reacção de carbonatação destas, o Ph vai baixando. Ao atingir valores de Ph próximos de 9, diz-se que a argamassa está carbonatada, sendo nesta gama de valores que o indicador fenolftaleína muda de cor, como se pode ver na Figura 3.25 [43].

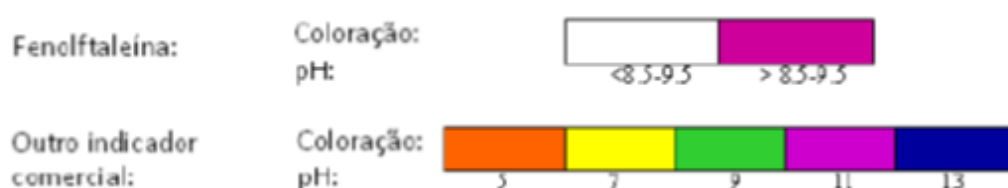


Figura 3.25 – Indicadores de Ph – Comparação entre a fenolftaleína e outros indicadores [43]

Ao colocar-se a solução de fenolftaleína sobre a amostra, deve observar-se a cor resultante à superfície. Esta, se se apresentar avermelhada, indica a presença de áreas não carbonatadas (alcalinas), enquanto que a não alteração de cor, indica áreas carbonatadas (neutras ou ácidas) [23].

De realçar que este ensaio deve ser realizado logo após a recolha das amostras, já que a coloração da fenolftaleína tem a tendência a esbater-se com o tempo, devido à diluição da humidade na superfície da amostra ou até porque o Ph entre a área não carbonatada e a área carbonatada difere consideravelmente [43].

3.2. Apresentação e análise dos resultados

3.2.1. Caracterização das paredes de alvenaria – síntese

Neste ponto é realizado uma síntese de algumas das características das paredes de alvenaria de pedra em estudo, assim como uma comparação com um caso estudo da vila histórica de Tentúgal existente na bibliografia [39]. São apresentados dados percentuais relativos à espessura das alvenarias, tipo de secção transversal, tipo de assentamento e tipo de aparelho das alvenarias do presente trabalho (à esquerda) e das alvenarias da vila histórica de Tentúgal (à direita).

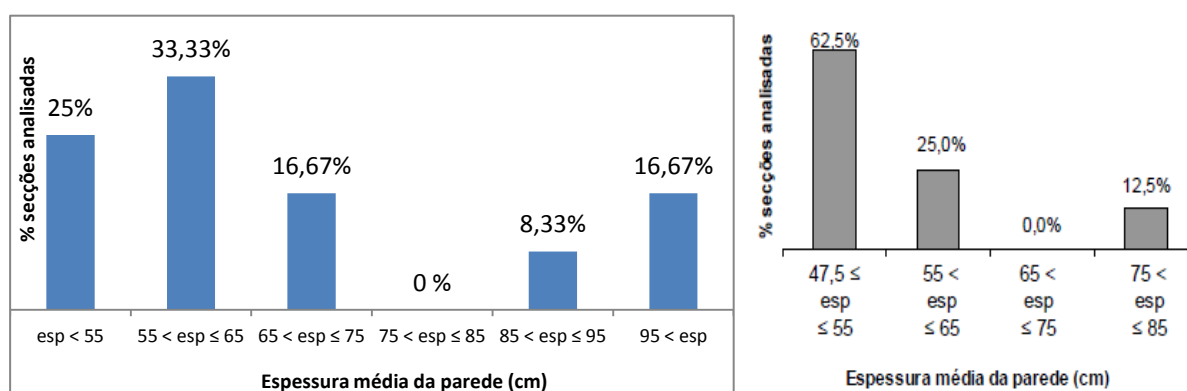


Figura 3.26 – Espessuras médias das alvenarias em estudo (esquerda) e alvenarias de Tentúgal (direita) [39]

A Figura 3.26 mostra a distribuição percentual das espessuras das alvenarias em estudo assim como as alvenarias do caso estudo realizado por Pagaimo (2004). Pode-se observar que a distribuição das espessuras, conforme as suas dimensões, não são semelhantes, tendo a maioria das alvenarias presentes em Tentúgal (62,5 %) espessuras compreendidas entre os 47,5 cm e os 55 cm, enquanto que as paredes em estudo neste trabalho têm maior incidência na gama de valores compreendida entre os 55 e os 65 cm (33,33 %). De salientar também que, ao contrário do caso estudo de Tentúgal, neste trabalho algumas das paredes em estudo apresentam espessuras superiores a 95 cm. Isto deve-se ao facto de não estarem a ser estudadas apenas alvenarias de pedra que pertenciam a edifícios habitacionais. Duas das paredes em estudo são eram pertencentes a um moinho de vento, caracterizado por ser uma construção em altura, para além de as alvenarias serem sujeitas a várias acções dinâmicas devido às pás do moinho. Estes factos levam a que as alvenarias necessitem de espessuras superiores ao normal.

Note-se que segundo estes dados, não existe um valor de espessura predominante, o que leva a crer que não existiam espessuras pré determinadas para a construção das alvenarias, apenas havia uma certa noção da dimensão transversal da alvenaria consoante a tipologia e as funcionalidades pretendidas.

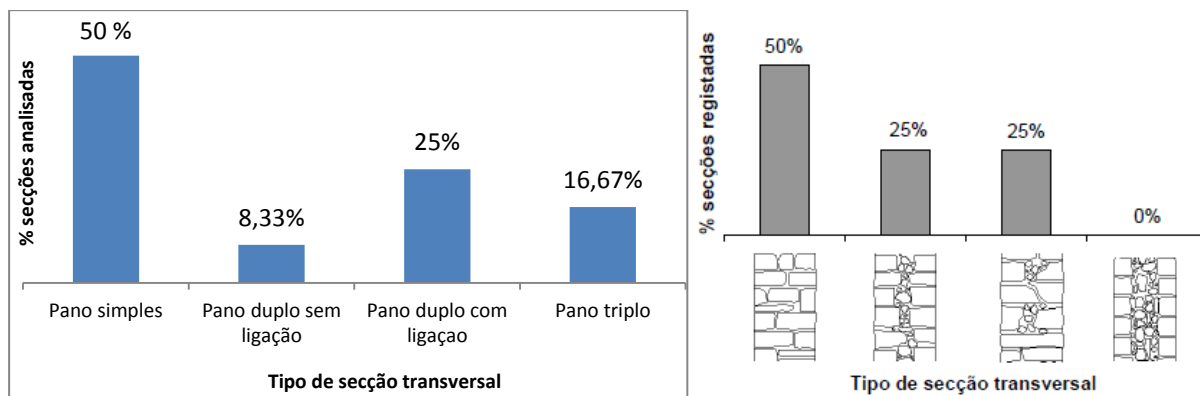


Figura 3.27 – Tipo de secção transversal das alvenarias em estudo (esquerda) e alvenarias de Tentúgal (direita) [39]

Relativamente à tipologia das secções transversais em estudo, Figura 3.27, pode-se afirmar que metade das alvenarias é de um só pano e que um quarto delas são panos duplos com conexão transversal (ligação). Mais uma vez, a existência de alvenarias de pano triplo neste estudo deve-se ao facto de se ter estudado as alvenarias de um moinho de vento, alvenarias estas que, como já foi referido, apresentam espessuras relativamente elevadas. Segundo Pagaimo, também as alvenarias analisadas em Tentúgal apresentam, em maioria, secções transversais de pano simples assim como também 25 % delas são de pano duplo com ligação. Sendo as alvenarias em estudo maioritariamente pertencentes a edifícios cujo uso era habitacional, estes valores podem indicar que em construções simples como edifícios habitacionais as paredes eram geralmente alvenarias de pano simples e por vezes duplo, conforme as necessidades funcionais.

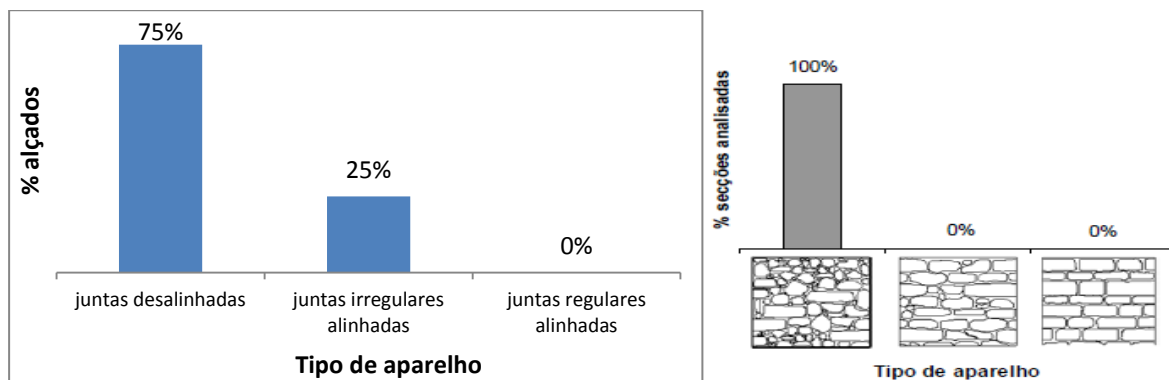


Figura 3.28 – Tipo de aparelho das alvenarias em estudo (esquerda) e alvenarias de Tentúgal (direita) [39]

Na Figura 3.28 pode-se observar a distribuição percentual referente ao tipo de aparelho de cada alvenaria. Este aspecto é observável através dos alçados das alvenarias (alçado das paredes) estão à vista, para que se possa averiguar e analisar a disposição das juntas. Segundo a Figura 3.28 em Tentúgal todas as alvenarias apresentam juntas desalinhasadas enquanto que apenas 75 % das alvenarias em estudo apresenta esse tipo de aparelho, sendo os restantes 25 % referentes a juntas irregulares alinhadas. De referir que a distribuição percentual, referente às alvenarias estudadas neste trabalho,

poderia ser mais similar ao caso de estudo de Tentúgal, caso a quantidade de alçados, das paredes de alvenaria analisadas, fosse superior (foram analisadas 4).

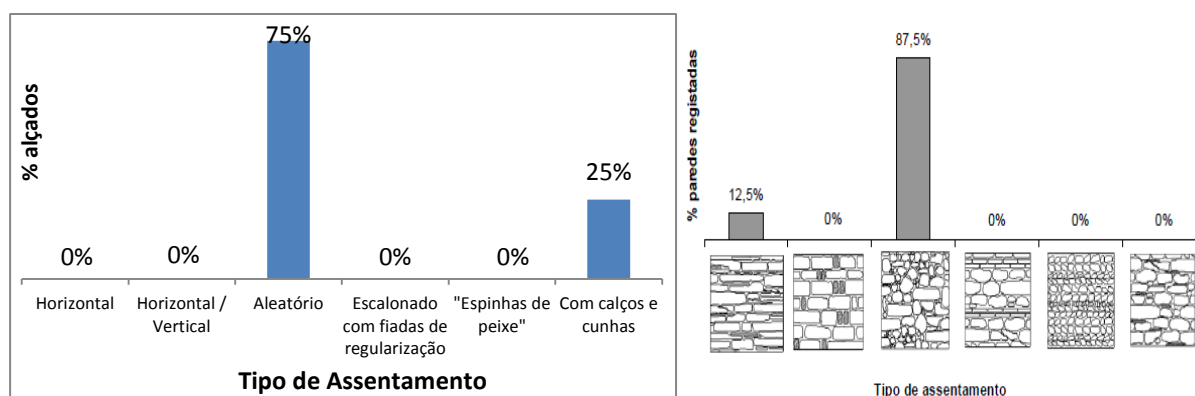


Figura 3.29 – Tipo de assentamento das alvenarias em estudo (esquerda) e alvenarias de Tentúgal (direita) [39]

Outro aspecto estudado é o tipo de assentamento das fiadas de pedras, podendo ser analisado através dos alçados das alvenarias (Figura 3.29). Pode-se dizer que o tipo de assentamento está relacionado com o tipo de aparelho já que, por exemplo, uma alvenaria que apresenta um alçado com juntas desalinhadas não pode ter uma classificação quanto ao assentamento de “horizontal / vertical”. Tanto nas alvenarias em estudo como nas alvenarias estudadas da vila histórica de Tentúgal existe a predominância de assentamentos do tipo aleatório, levando a crer que não havia uma grande preocupação quando ao assentamento das pedras em fiadas regulares, horizontais ou verticais. Os 25% existentes do gráfico à esquerda na Figura 3.29 correspondem ao assentamento do tipo “calços e cunhas” existente na parede F da zona “Pilotos” como ilustra a Figura 3.30.



Figura 3.30 – Parede F da zona “Pilotos” – Assentamento do tipo “calços e cunhas”

3.2.2. Caracterização das paredes de alvenaria – quantificação dos materiais

Após o estudo das secções transversais (12 secções) e dos alçados (4 alçados) das paredes de alvenaria na ferramenta de desenho computacional *Autocad 2013*, foram quantificadas as áreas referentes a cada um dos materiais e também dos vazios de modo a perceber-se a composição quantitativa destes componentes nas alvenarias.

3.2.2.1. Secções transversais

As paredes em estudo apresentavam, como esperado, dois materiais em maior quantidade em comparação com os restantes, sendo estes materiais as pedras, tanto calcárias como argilosas, assim como a argamassa à base de cal aérea, que em certos casos continha adições pozolânicas, mas com composições diferentes de zona para zona e até em certos casos de parede para parede, como já foi referido. Os gráficos seguintes (Figura 3.31 até 3.35) mostram as áreas de cada material em cada secção transversal das paredes, assim como os Quadro 3.15 a 3.19:

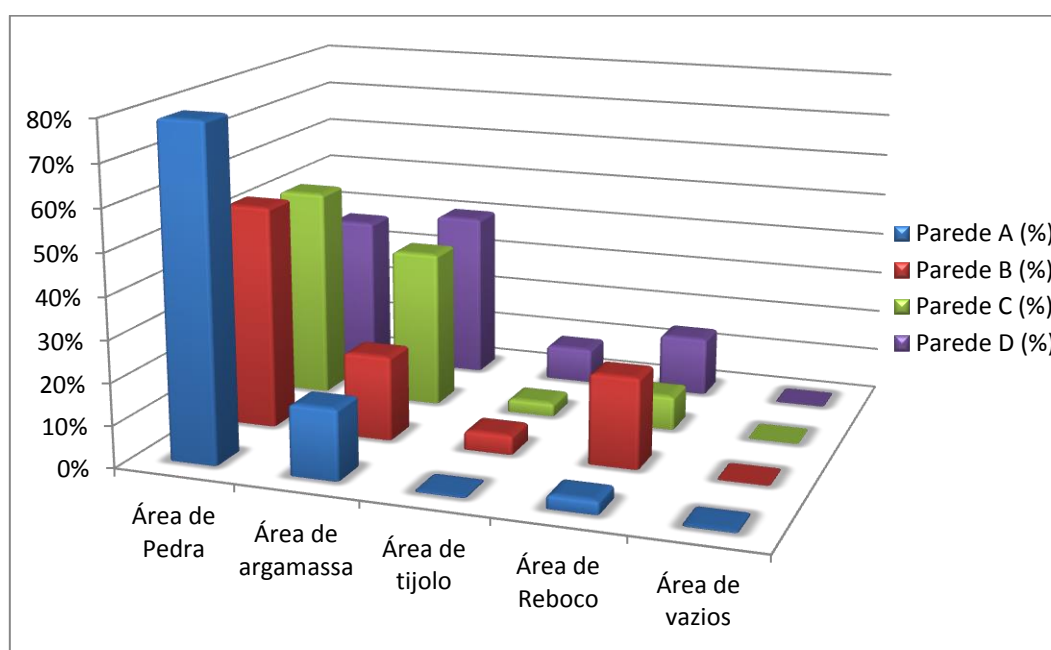


Figura 3.31 – Áreas de materiais por parede da zona “Charneca”

Quadro 3.15 – Médias percentuais dos materiais das paredes da zona “Charneca”

Zona - Charneca	Área de Pedra	Área de argamassa	Área de tijolo	Área de Reboco	Área de vazios
Médias dos materiais das secções transversais por zona	55,1%	28,8%	4,2%	11,8%	0,1%

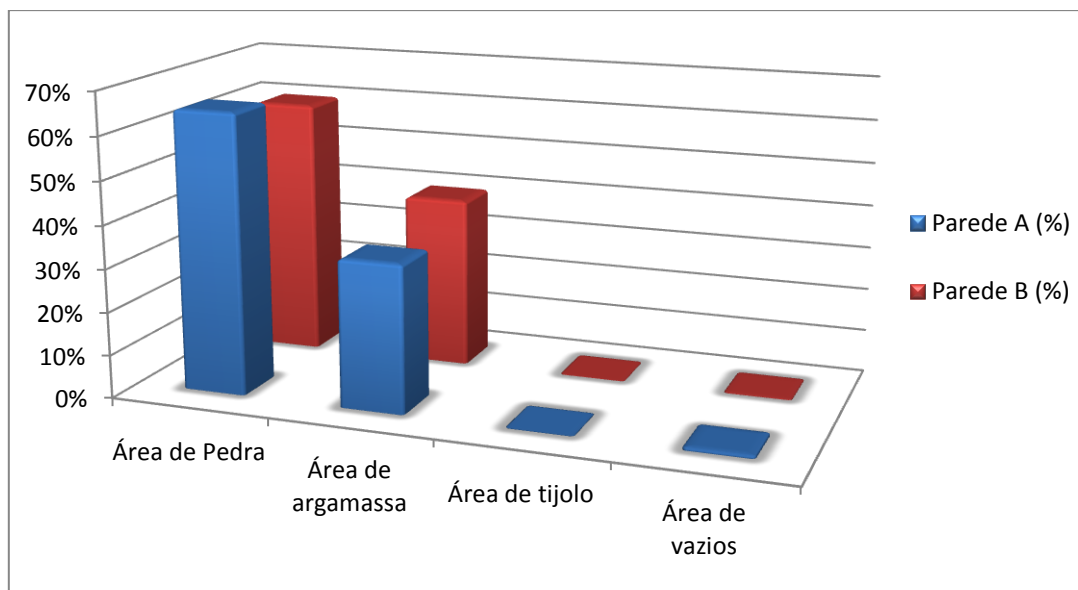


Figura 3.32 - Áreas de materiais por parede da zona "Vila Nova"

Quadro 3.16 - Médias percentuais dos materiais das paredes da zona "Vila Nova"

Zona - Vila Nova	Área de Pedra	Área de argamassa	Área de tijolo	Área de vazios
Médias dos materiais das secções transversais por zona	62,4%	37,0%	0,1%	0,5%

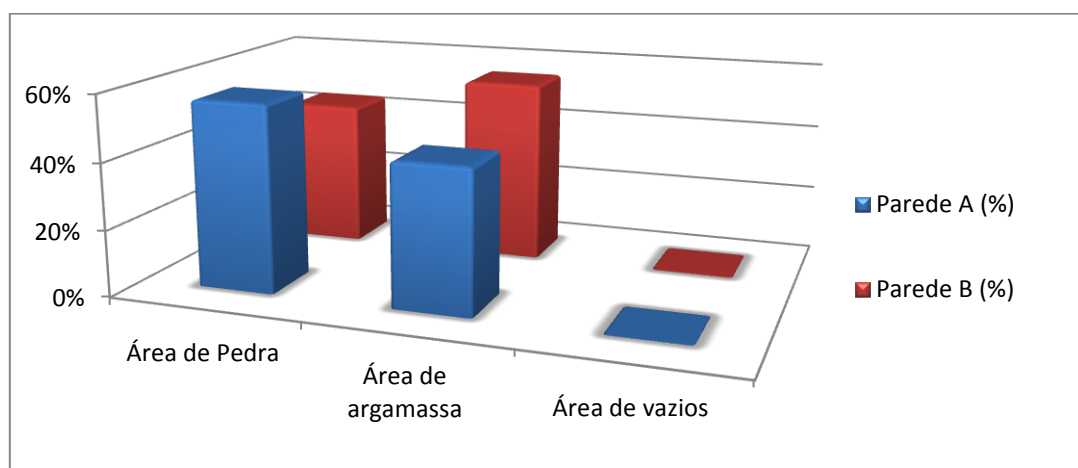


Figura 3.33 - Áreas de materiais por parede da zona "Moinho"

Quadro 3.17 - Médias percentuais dos materiais das paredes da zona "Moinho"

Zona - Moinho	Área de Pedra	Área de argamassa	Área de vazios
Médias dos materiais das secções transversais por zona	50,5%	49,3%	0,2%

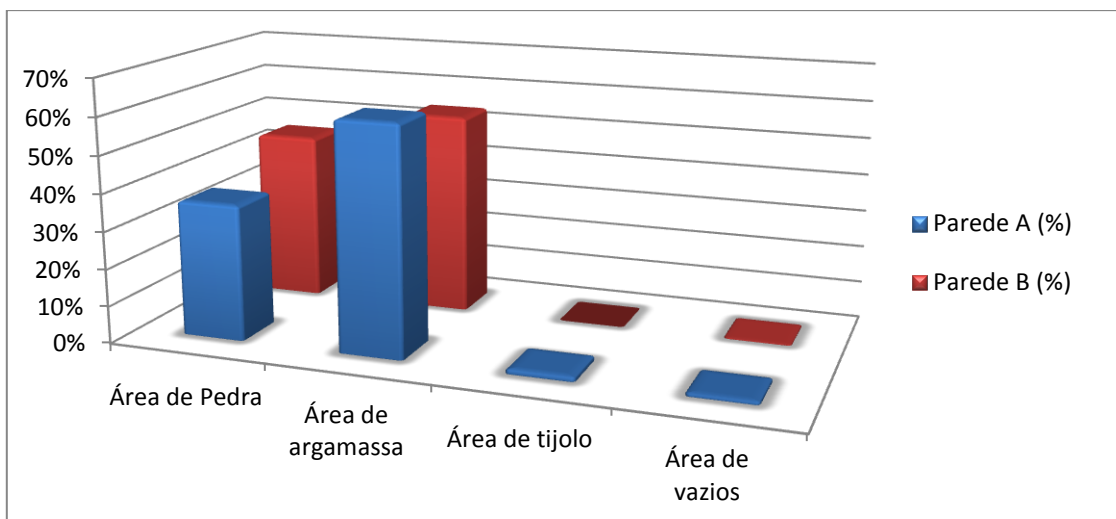


Figura 3.34 - Áreas de materiais por parede da zona "Faculdade"

Quadro 3.18 - Médias percentuais dos materiais das paredes da zona "Faculdade"

Zona - Faculdade	Área de Pedra	Área de argamassa	Área de tijolo	Área de vazios
Médias dos materiais das secções transversais por zona	41,0%	57,7%	0,7%	0,6%

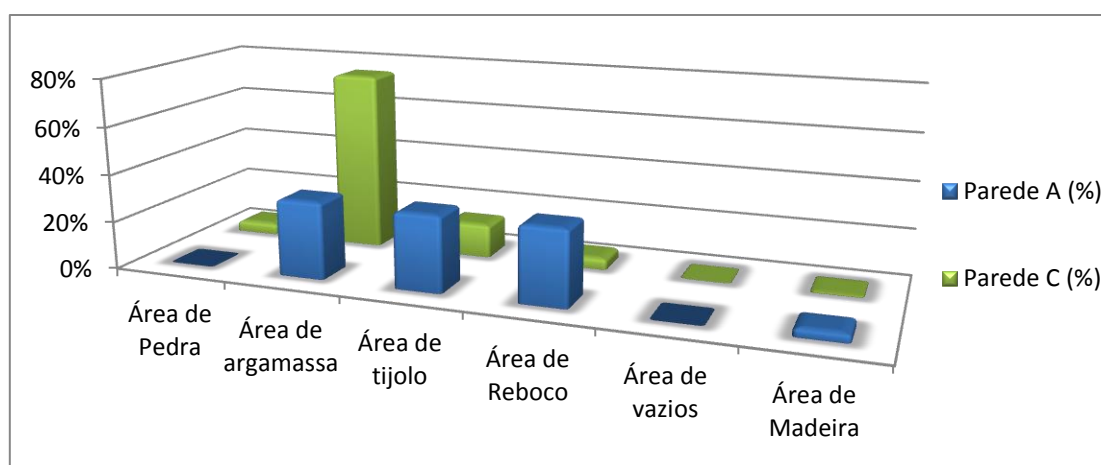


Figura 3.35 - Áreas de materiais por parede da zona "Pilotos"

Quadro 3.19 - Médias percentuais dos materiais das paredes da zona "Pilotos" - secções transversais

Zona - Pilotos	Área de Pedra	Área de argamassa	Área de tijolo	Área de Reboco	Área de vazios	Área de Madeira
Médias dos materiais das secções transversais por zona (Paredes A e C)	2,4%	54,0%	23,1%	18,3%	0,0%	2,2%

Quadro 3.20 - Média percentual dos materiais das secções transversais de todas as zonas

	Área de Pedra	Área de argamassa	Área de tijolo	Área de Reboco	Área de vazios	Área de Madeira
Média global dos materiais das secções transversais	42,3%	45,4%	5,6%	6,0%	0,3%	0,4%

3.2.2.2. Alçados

As áreas dos materiais das Alçados são apresentadas na Figura 3.36 e no Quadro 3.21:

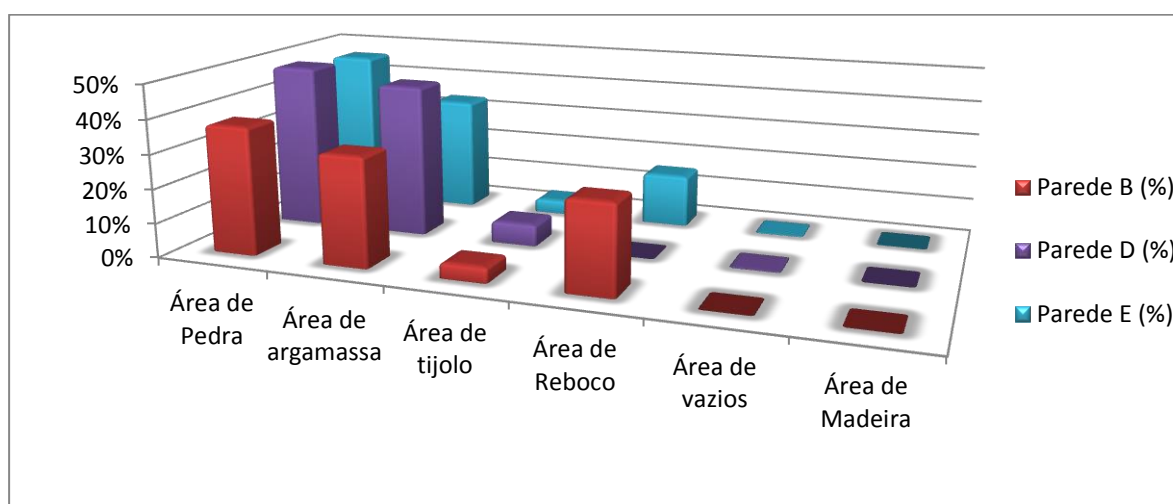


Figura 3.36 - Áreas de materiais por parede da zona “Pilotos”

Quadro 3.21 – Médias percentuais dos materiais das paredes da zona “Pilotos” – alçados

Zona - Pilotos	Área de Pedra	Área de argamassa	Área de tijolo	Área de Reboco	Área de vazios	Área de Madeira
Médias dos materiais dos alçados por zona (Paredes B, D e E)	44,1%	36,8%	5,0%	13,9%	0,2%	0,0%

Ao analisar-se estes gráficos, como já foi referido, é manifestamente visível a grande diferença entre a quantidade de pedras e argamassa e a quantidade dos restantes elementos. Isto era esperado uma vez que as paredes em estudos são alvenarias de pedra, e a característica principal destas alvenarias é ter uma estrutura, neste caso, de pedra, ligada por argamassa.

Em média, as paredes no global apresentavam nas suas secções transversais, como apresentado no Quadro 3.20, 42,3% de pedra, 45,4% de argamassa, 5,6% de elementos cerâmicos, 6% de reboco, 0,3% de vazios e 0,4% de madeira. Relativamente aos alçados estes apresentam valores ligeiramente diferentes. Em média os alçados, têm 44,1% de pedra, 36,8% de argamassa, 5% de

elementos cerâmicos, 13,9% de reboco e não apresentam elementos em madeira. Estes resultados levam a crer que a avaliação da quantidade dos materiais através da análise dos alçados induz em erros. Segundo Carvalho (2011), a quantificação das pedras do alçado não é uma análise com nexos, uma vez que pode levar a erros aquando da delimitação das pedras, já que a real dimensão das pedras não é visível devido às argamassas existentes nas juntas [16].

Estas percentagens demonstram conclusivamente que este tipo de paredes, para além das pedras e da argamassa, eram construídas com mais tipos de materiais, normalmente materiais que estivessem próximos da zona de construção ou até mesmo restos de materiais utilizados noutros elementos da construção. Estes materiais eram utilizados em mistura com argamassa, fazendo com que a quantidade de argamassa necessária fosse menor e eram, por exemplo, utilizados entre os panos da alvenaria. Esse enchimento de materiais inertes, é comumente chamado de entulho. Relativamente à percentagem de vazios (0,3%), valor significativamente baixo, leva a concluir que as paredes de alvenaria de pedra são estruturas maciças, indo de encontro ao publicado por outros autores, como L. Binda, que afirma que estas se comportam como um só elemento (comportamento monolítico).

3.2.3. Caracterização das paredes de alvenaria – áreas, diâmetros e menores dimensões dos vazios

No seguimento da análise da secção transversal das paredes de alvenaria de pedra, na ferramenta de desenho computacional *Autocad 2013*, referida no ponto 3.1.4, foram medidas as áreas dos vazios, os seus diâmetros e a menor dimensão destes apenas nessas secções.

Este estudo, dos vazios encontrados nas secções transversais das paredes de alvenaria de pedra, teve como intuito conhecer a porosidade das secções transversais destas paredes, assim como fazer uma avaliação para futuras intervenções de reabilitação e/ou reparação, como por exemplo através de injeções de caldas.

Apesar da avaliação da porosidade global das paredes de alvenaria, através de fotografias da secção transversal destas, ser de relativamente rápida execução, esta avaliação não é concretamente precisa uma vez que depende da opinião pessoal e do ponto de vista do avaliador. Para além disto, é de ter em atenção também que as secções transversais das alvenarias em estudo são secções que estão à vista há algum tempo, estando assim sujeitas a deteriorações de variados tipos, físicas, químicas, mecânicas e até biológicas. Estas secções, devido a este aspecto estão sujeitas, por exemplo, a acções de ordem climática (chuva, vento, etc.), acções humanas, variações de temperatura mais consideráveis, presença de sais solúveis e de compostos minerais que reajam com os gases atmosféricos provenientes da poluição e ataques de fungos, etc.

3.2.3.1. Áreas dos vazios das alvenarias

O cálculo das áreas dos vazios, da mesma forma que para as áreas dos materiais, foi feito através da análise individual do comando “*hatch*” que nos fornece dados como área e perímetro.

Posto isto, são apresentadas em seguida nas Figura 3.37 a 3.41 as áreas dos vazios, divididas por intervalos, para que se possa ter uma noção, no geral, da quantidade de vazios com uma determinada gama de valores.

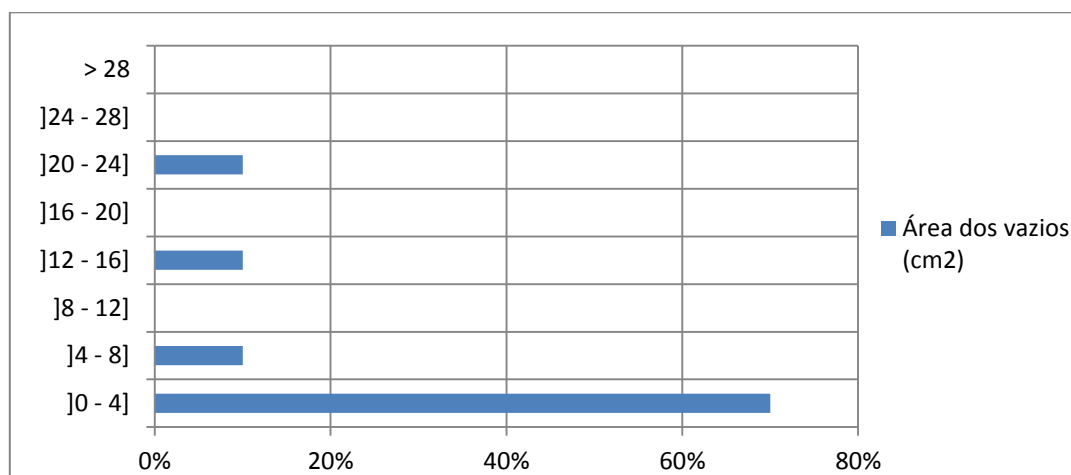


Figura 3.37 – Áreas dos vazios por intervalos das secções transversais da zona “Charneca”

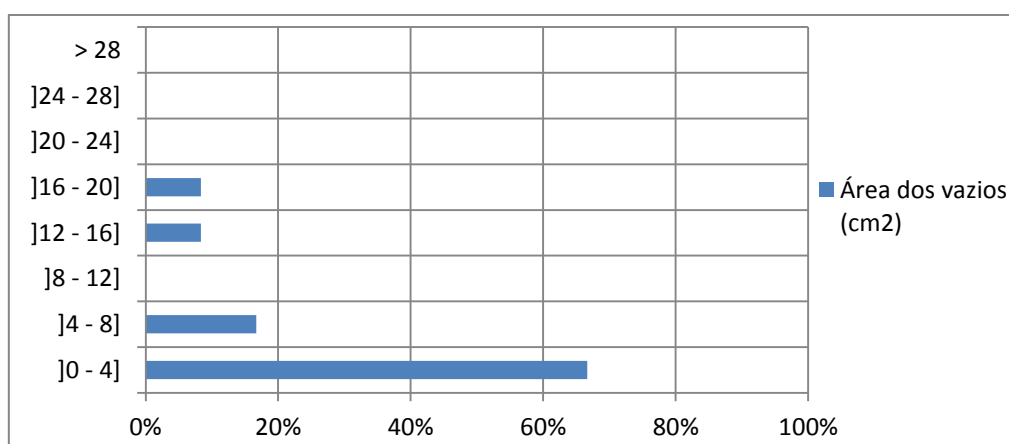


Figura 3.38 – Áreas dos vazios por intervalos das secções transversais da zona “Moinho”

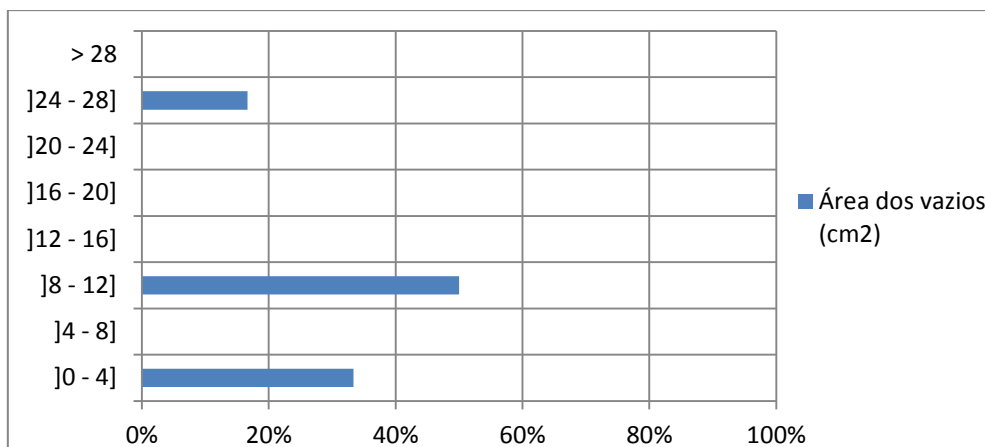


Figura 3.39 – Área dos vazios por intervalos das secções transversais da zona “Vila Nova”

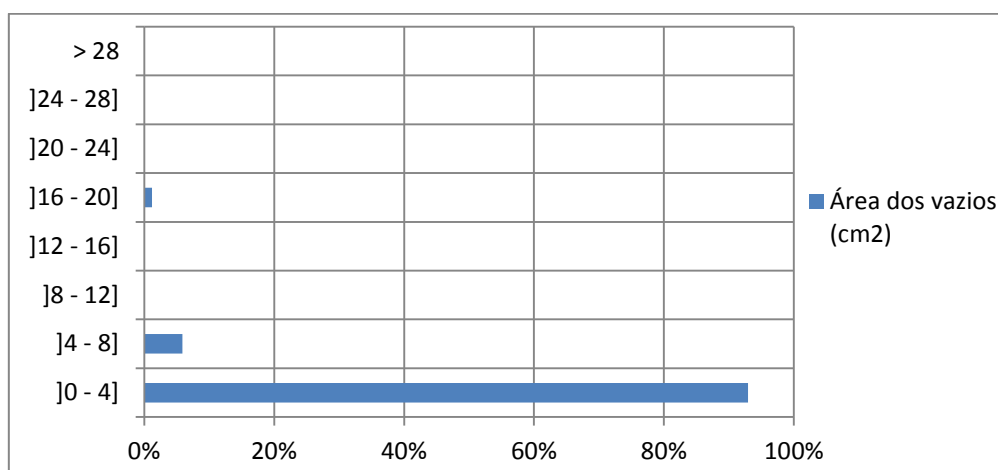


Figura 3.40 – Áreas dos vazios por intervalos das secções transversais da zona “Faculdade”

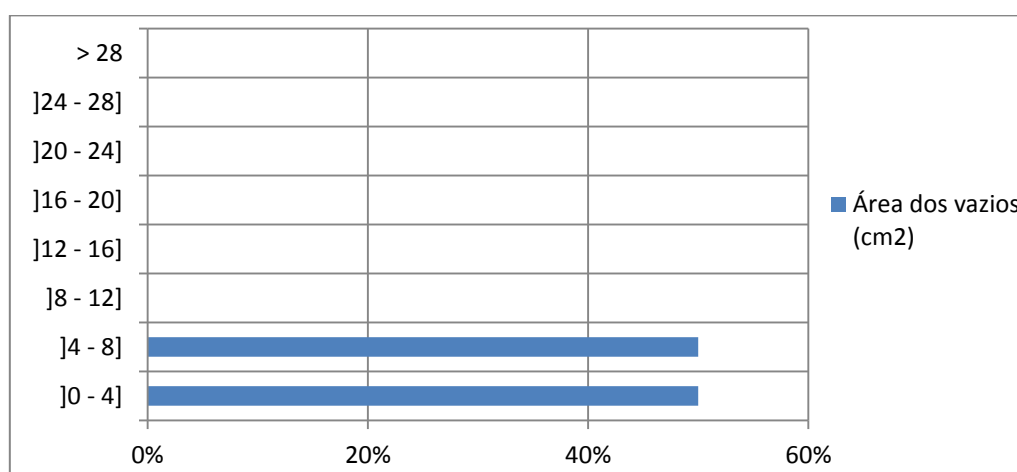


Figura 3.41 – Áreas dos vazios por intervalos das secções transversais da zona “Pilotos”

Ao analisarem-se os gráficos, pode-se constatar que os vazios das paredes no global, apresentam valores baixos, em que a maioria das áreas encontradas estão entre os 0 e os 4 cm², confirmando a característica de comportamento monolítico deste género de alvenaria, devido aos seus materiais estarem fortemente ligados e assim conferirem a esta uma aparência bastante compacta.

De notar também que nas paredes de alvenaria existentes na zona “Vila Nova” existem vazios com dimensões mais consideráveis com áreas superiores aos 24 cm² mas de carácter pontual, levando a crer, que estes vazios de maiores áreas, poderão ter ocorrido devido às já referidas acções de deterioração.

L. Binda, uma das pioneiras em estudos das secções transversais de alvenarias de pedra, realizou um estudo, entre os anos de 1995 e 1999, que englobava cerca de 200 secções transversais de alvenarias de diferentes regiões italianas tais como Lombardia, Friuli, Liguria, Basilicata e Trentino. Esta pesquisa sobre secções transversais de alvenarias de pedra, permitiu a L. Binda, para além de outros parâmetros, conhecer a dimensão (áreas) dos vazios dessas secções, dimensões estas apresentadas na Figura 3.42.

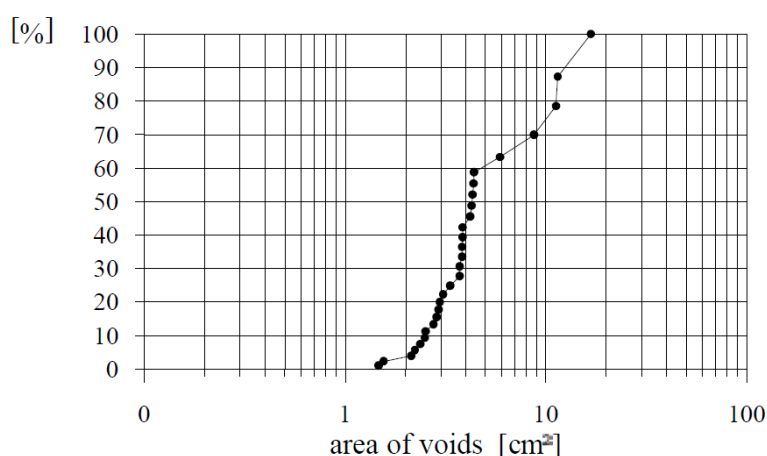


Figura 3.42 – Dimensões (áreas) dos vazios das secções transversais estudadas por L. Binda em 1997 [9]

É possível observar, pelo gráfico da Figura 3.42, que as alvenarias estudadas por L. Binda, apresentavam vazios com áreas compreendidas entre os 1,5 cm² e os 18 cm² no global. Para além disso, 60% do total dos vazios apresentavam áreas com valores entre 1,5 cm² e 4,5 cm² e os restantes 40% tinham áreas entre os 4,5 cm² e 18 cm². Comparando os valores obtidos por L. Binda com os valores obtidos no presente estudo, valores estes que apresentavam, 84% das áreas dos vazios entre os 0 cm² e os 4 cm², 13% dos vazios com áreas entre os 4 cm² e os 20 cm² e os restantes 3% correspondiam a áreas superiores aos 20 cm², é possível verificar que os valores diferem substancialmente, podendo-se afirmar que as alvenarias em estudo são mais compactas que as estudadas por L. Binda.

Esta observação pode levar à conclusão de que as paredes de alvenaria de pedra, independentemente do local em que foram construídas, podem diferir quer em termos de características e geometria, quer em termos de composição e comportamento.

3.2.3.2. *Diâmetros e menor dimensão dos vazios das alvenarias*

Aproveitando as áreas dos vazios retiradas do *Autocad*, e admitindo que os vazios têm forma circular, foram calculados os diâmetros destes e agrupados em intervalos com gamas de valores diferentes de zona para zona conforme os valores encontrados. Quanto à menor dimensão dos vazios esta foi calculada também na ferramenta de desenho computacional *Autocad* 2013 recorrendo ao comando “*dist*” o qual fornece distâncias.

É possível verificar nos gráficos das Figura 3.43 a 3.47 que os valores, quer dos diâmetros quer das menores dimensões dos vazios, diferem substancialmente de zona para zona, sendo mais uma vez esperado que isto acontecesse devido à diferença de materiais, de mão-de-obra especializada e técnicas construtivas entre estas.

O diâmetro dos vazios, na sua maioria, apresentam valores relativamente baixos, sendo possível identificar que a gama de valores entre 1 e 3 cm tem mais ênfase no conjunto dos gráficos, apesar de haver diâmetros superiores a estes, especialmente na zona “Charneca” e na zona “Vila Nova”.

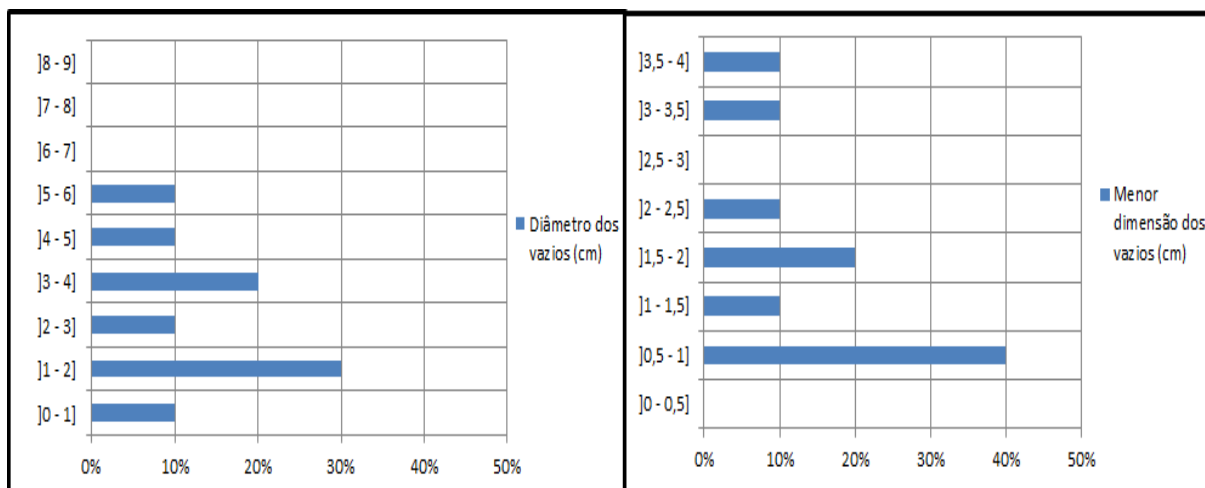


Figura 3.43 – Diâmetro (esquerda) e menor dimensão dos vazios (direita) por intervalos das secções transversais da zona “Charneca”

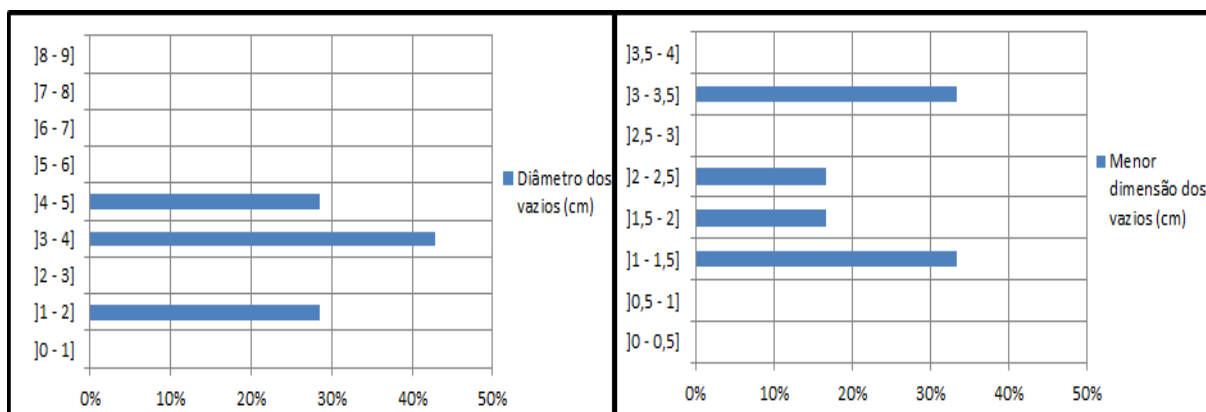


Figura 3.44 - Diâmetro (esquerda) e menor dimensão dos vazios (direita) por intervalos das secções transversais da zona "Vila Nova"

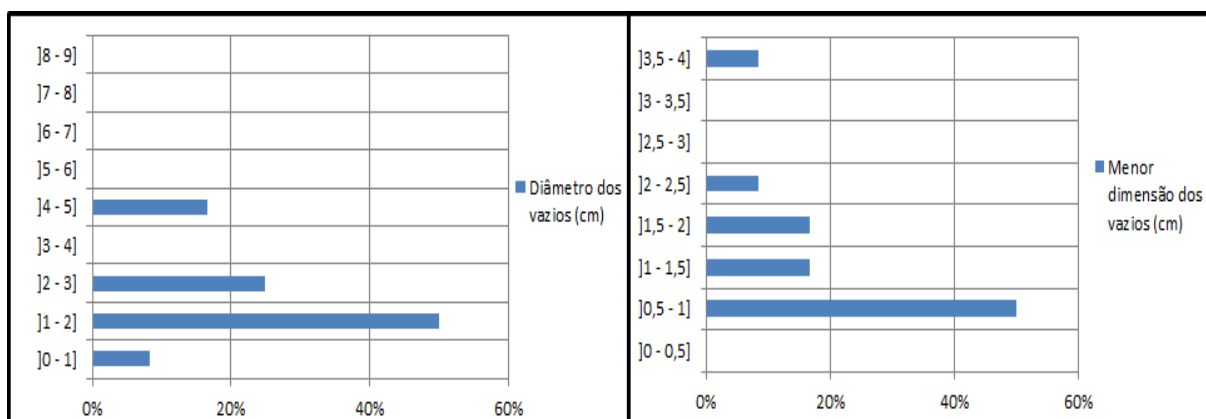


Figura 3.45 - Diâmetro (esquerda) e menor dimensão dos vazios (direita) por intervalos das secções transversais da zona "Moinho"

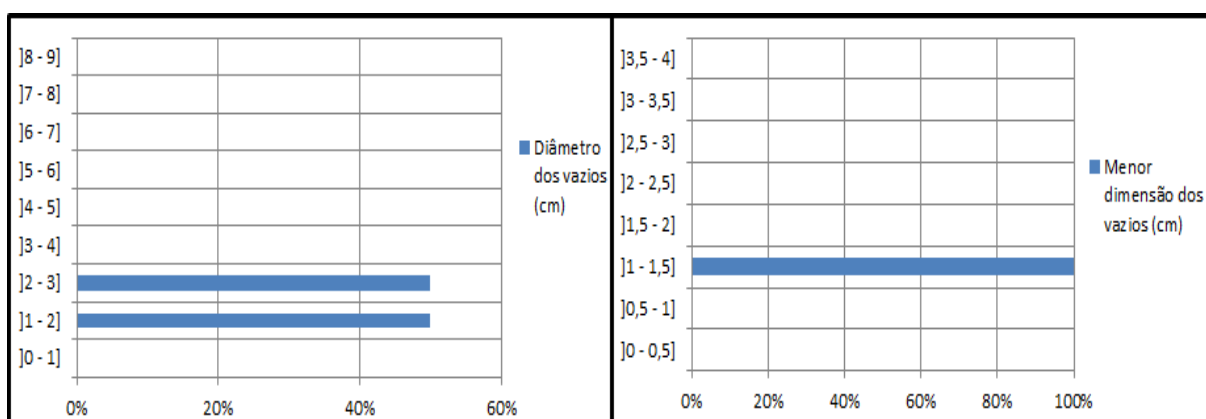


Figura 3.46 - Diâmetro (esquerda) e menor dimensão dos vazios (direita) por intervalos das secções transversais da zona "Pilotos"

Relativamente à menor dimensão dos vazios, esta tem especial importância em âmbitos de reabilitação e/ou reparação de estruturas, aquando do reforço destas, através de injeções de caldas. É

necessário conhecer este factor juntamente com o tipo de argamassas existentes nessas estruturas, para que se possa escolher de uma forma ponderada e fundamentada a composição dessas caldas. Para uma boa e eficaz reabilitação e/ou reparação dessas estruturas é importante que ao realizar as injecções das caldas nessas, as caldas consigam escoar e preencher todos os vazios da estrutura. Sabendo a menor dimensão dos vazios de cada parede, tendo em conta este aspecto e escolhendo caldas que se adequem às características necessárias ao seu reforço, torna-se mais difícil realizar um mau ou insignificante reforço.

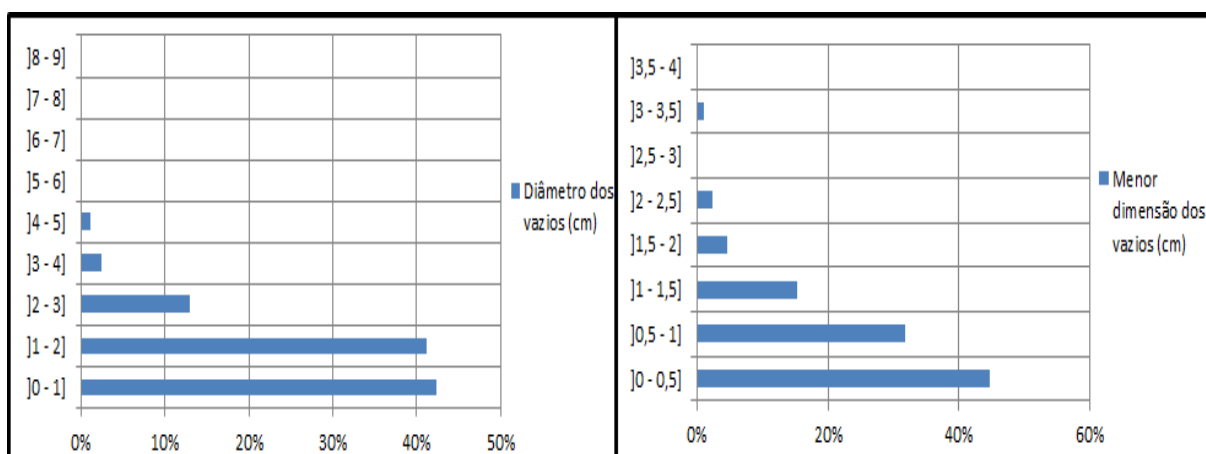


Figura 3.47 – Diâmetro (esquerda) e menor dimensão dos vazios (direita) por intervalos das secções transversais da zona “Faculdade”

3.2.4. Análise granulométrica

Ao observar-se as curvas granulométricas das argamassas referentes às diferentes paredes em estudo, é visível que todas as curvas manifestam uma granulometria contínua e extensa, sendo este aspecto de extrema importância juntamente com a forma dos agregados, os quais como já foi referido, conferem uma maior compacidade e resistência à argamassa para uma certa dosagem de ligante e diminuem o risco de segregação. As paredes apresentam partículas sólidas com tamanhos variados entre os 0,075 mm e os 25 mm exclusive. De referir que a análise granulométrica foi realizada apenas a amostras retiradas das secções transversais das alvenarias em estudo.

Quadro 3.22 – Análise percentual da granulometria da parede A da zona “Moinho”

	Britas		Areia			Silte	Argila	Parede - Amostra
			Grosseira	Media	Fina			
(mm)	>4	2<x<4	0,6<x<2	0,2<x<0,6	0,064<x<0,2	0,004<x<0,064	x<0,004	
%	50,2	11,4	35,1	3,3	0	0	0	A-1
	73,9	7,3	15,1	3,7	0	0	0	A-2

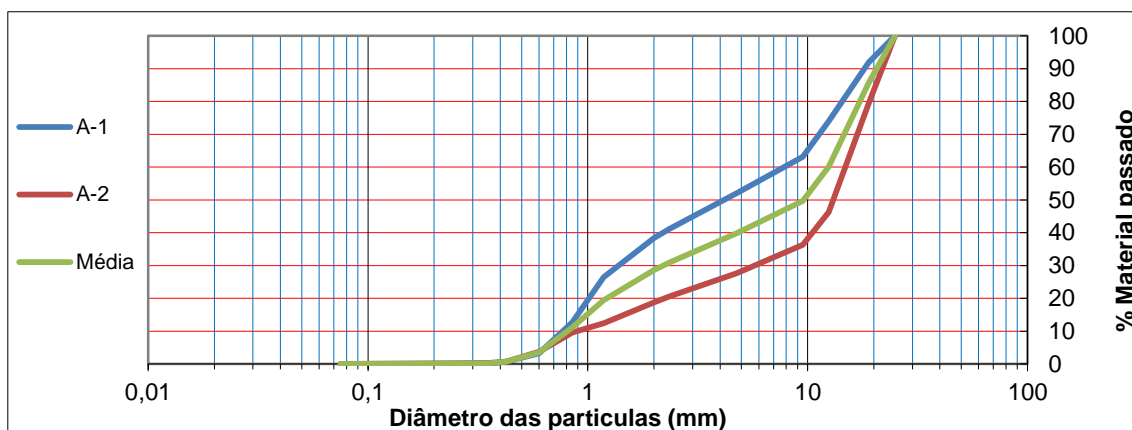


Figura 3.48 – Curva granulométrica da parede A da zona “Moinho”

Para se ficar com uma noção da distribuição do tamanho dos agregados, foi tida como referência a escala logarítmica de classificação granulométrica criada, em 1922, por C. K. Wentworth. Esta escala, divide o tamanho das partículas segundo o seu diâmetro maior e apresenta gamas de valores compreendidas entre os 0 e o 4 μm para as argilas, os 4 μm e 6,4 μm para os siltes, os 6,4 μm e os 2 mm para as areias, entre os 2 e os 4 mm e acima dos 4 mm para as britas.

Apesar da granulometria ser contínua, tendo agregados de diferentes tamanhos, existem certas fracções em maiores percentagens, nomeadamente as britas com dimensões compreendidas acima dos 4 mm, o que só não acontece num casos pontual, na parede A-1 da zona “Charneca” (Quadro 3.23), sendo a maior percentagem neste caso, a da areia grossa com dimensões entre os 0,6 mm e os 2 mm. Como é sabido, os agregados utilizados no fabrico das argamassas, usualmente não apresentam dimensões superiores a 3 ou 4 mm, e uma vez que as amostras recolhidas, na sua maioria, das secções transversais, apresentavam partículas com dimensões superiores às referidas, pode-se concluir que eram utilizadas agregados com dimensões superiores a 4 mm (seixos) em mistura com as argamassas com o objectivo de preencher o espaço e reduzir a quantidade de argamassa a utilizar.

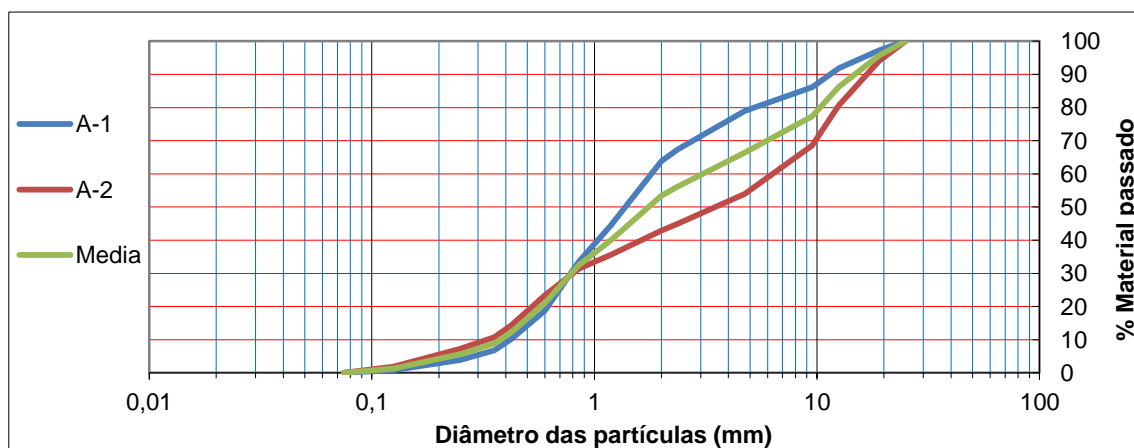


Figura 3.49 - Curva granulométrica da parede A da zona “Charneca”

Outro facto observado, é o de que a segunda fracção com maior percentagem, é a da areia grosseira, facto que faz crer que as argamassas de cal aérea eram fabricadas com agregados graúdos. Isto leva ao pressuposto de que, havendo a predominância de agregados graúdos, e claro, tendo em consideração uma mesma razão água/ligante, e podendo até haver uma quantidade excessiva destes, poderá até existir atrito directo entre agregados, resultando numa perda da plasticidade e também poderá levar a maiores possibilidades de fendilhação devido à ligação agregado/ligante ser menos resistente. É sabido também que, areias de maiores dimensões influenciam a quantidade de água necessária para uma boa trabalhabilidade. Quanto maior forem os agregados, menores as quantidades de água para uma trabalhabilidade equivalente, uma vez que, em geral, é a superfície específica, razão entre a superfície total e o volume das partículas de um agregado, que determina a quantidade de água necessária para molhar e lubrificar a mistura. Também como já foi referido, quanto maior a dimensão das partículas menor a superfície específica [20].

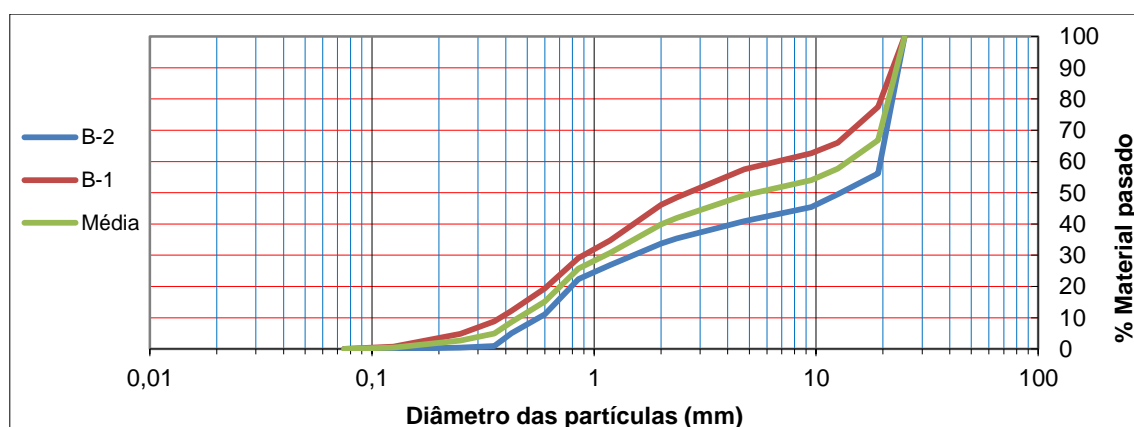


Figura 3.50 - Curva granulométrica da parede B da zona “Charneca”

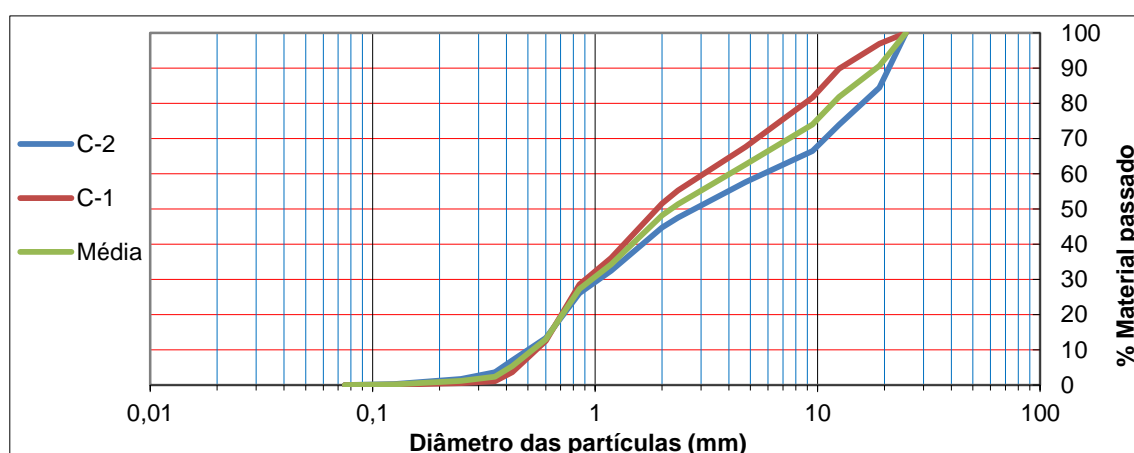


Figura 3.51 - Curva granulométrica da parede C da zona “Charneca”

Também devido ao facto dos agregados em predominância serem graúdos, pode-se afirmar que as argamassas têm resistência mecânica reduzida devido a esse facto, uma vez que quanto maior

forem os agregados menos resistente será a ligação agregado/ligante, já que um agregado de maior dimensão, apesar de ter uma superfície específica menor comparativamente ao agregado mais pequeno, leva à formação de uma zona de transição menos resistente, sendo este efeito mais evidente em argamassas com baixa razão água / ligante [20].

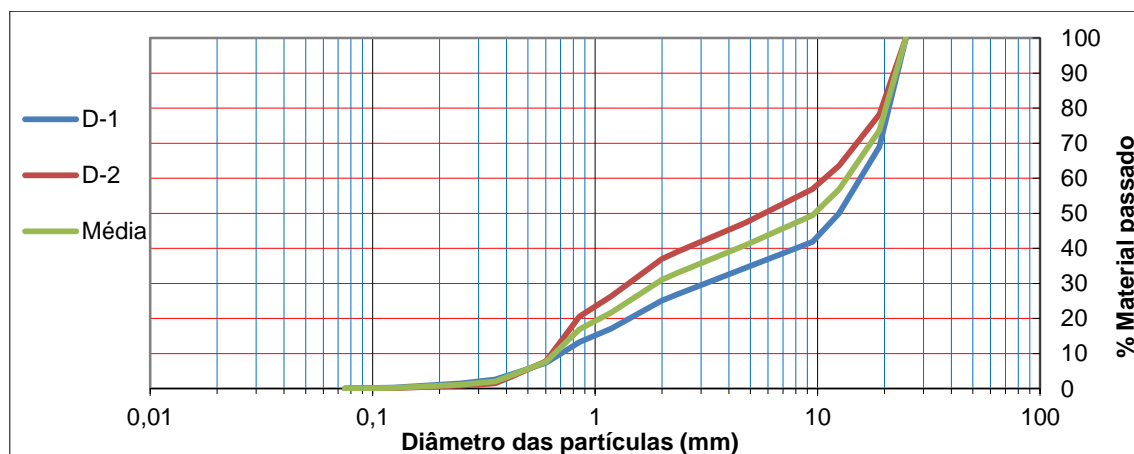


Figura 3.52 - Curva granulométrica da parede D da zona “Charneca”

Quadro 3.23 - Análise percentual da granulometria das paredes da zona “Charneca”

	Britas		Areia			Silte	Argila	Parede - Amostra
			Grosseira	Media	Fina			
(mm)	>4	2<x<4	0,6<x<2	0,2<x<0,6	0,064<x<0,2	0,004<x<0,064	x<0,004	
%	22,8	13,3	45,1	15,7	3,1	0	0	A-1
	46,1	11,0	19,5	16,9	6,5	0	0	A-2
	44,8	9,1	26,7	15,7	3,7	0	0	B-1
	60,7	5,6	22,6	11,0	0,15	0	0	B-2
	34,7	13,7	39,1	12,2	0,3	0	0	C-1
	44,5	10,8	31,3	12,2	1,2	0	0	C-2
	66,9	8,0	17,7	6,5	0,9	0	0	D-1
	54,7	8,3	29,2	7,5	0,3	0	0	D-2

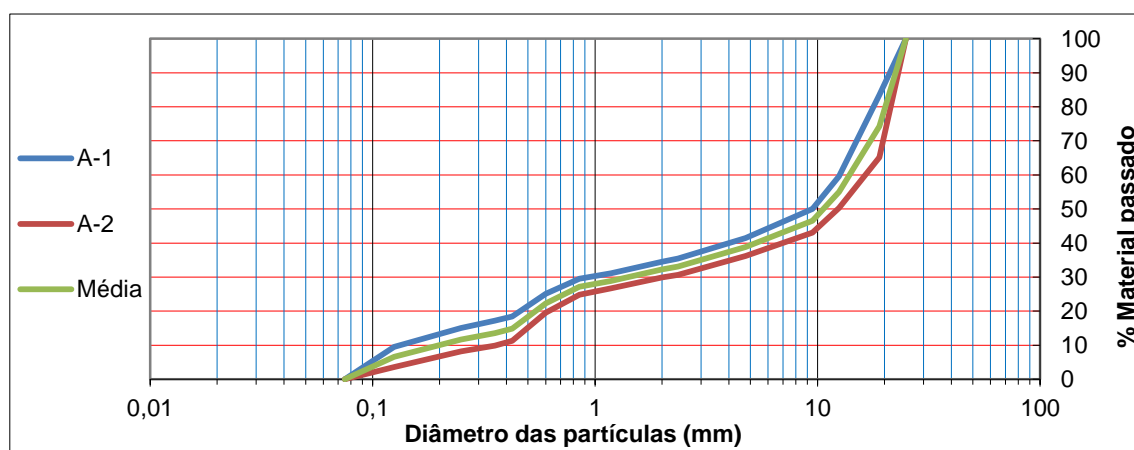


Figura 3.53 - Curva granulométrica da parede A da zona “Vila Nova”

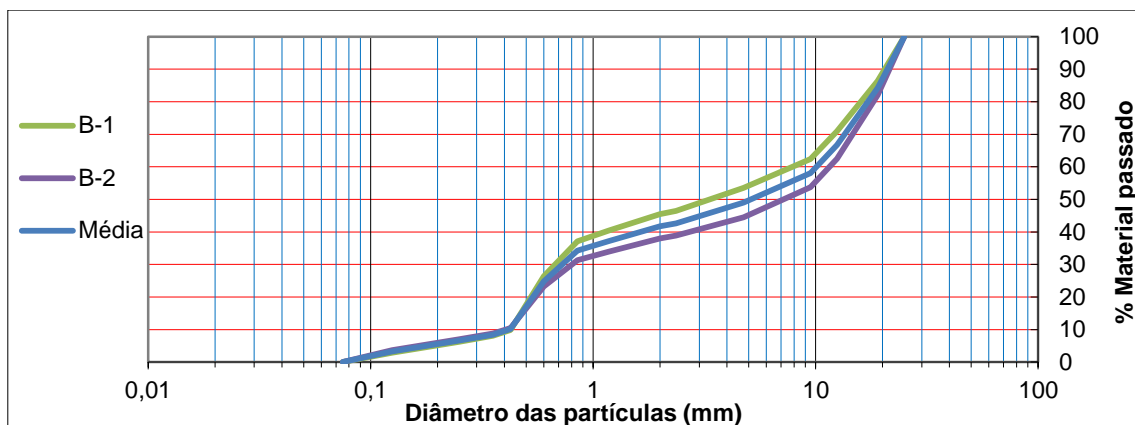


Figura 3.54 - Curva granulométrica da parede B da zona “Vila Nova”

Quadro 3.24 - Análise percentual da granulometria das paredes da zona “Vila Nova”

	Britas		Areia			Silte	Argila	Parede - Amostra
			Grosseira	Media	Fina			
(mm)	>4	2<x<4	0,6<x<2	0,2<x<0,6	0,064<x<0,2	0,004<x<0,064	x<0,004	
%	60,0	5,5	9,5	12,1	13,0	0	0	A-1
	66,0	1,8	9,9	14,3	8,0	0	0	A-2
	50,0	4,6	19,0	20,5	5,9	0	0	B-1
	58,0	4,0	14,8	17,2	6,0	0	0	B-2

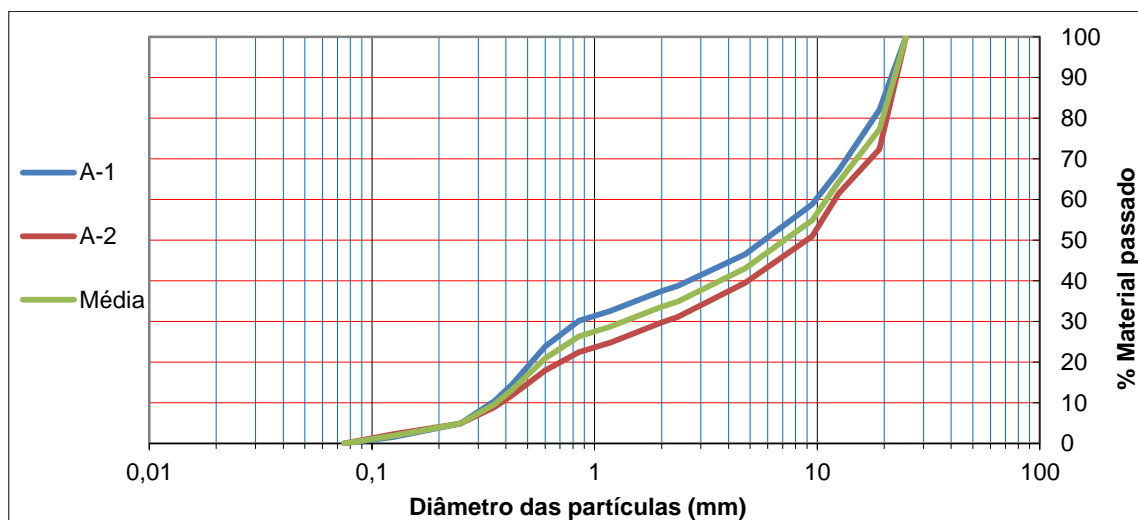


Figura 3.55 - Curva granulométrica da parede A da zona “Faculdade”

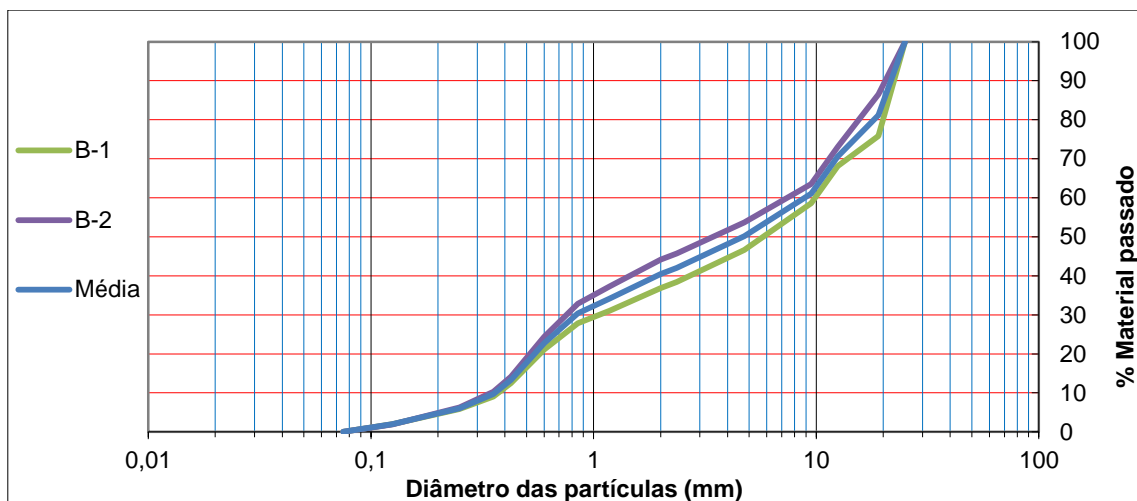


Figura 3.56 - Curva granulométrica da parede B da zona “Faculdade”

Quadro 3.25 - Análise percentual da granulometria das paredes da zona “Faculdade”

	Britas		Areia			Silte	Argila	Parede - Amostra
			Grosseira	Media	Fina			
(mm)	>4	2<x<4	0,6<x<2	0,2<x<0,6	0,064<x<0,2	0,004<x<0,064	x<0,004	
%	55,8	6,7	13,7	19,6	4,2	0	0	A-1
	62,4	7,9	11,8	13,8	4,1	0	0	A-2
	56,1	7,0	15,8	16,0	5,1	0	0	B-1
	48,5	7,3	19,8	18,8	5,6	0	0	B-2

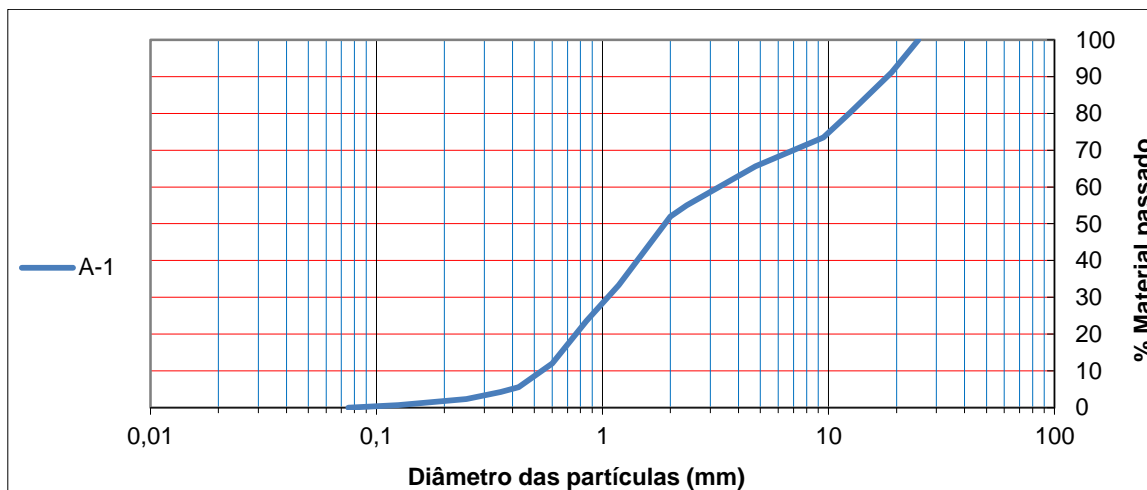


Figura 3.57 - Curva granulométrica da parede A da zona “Pilotos”

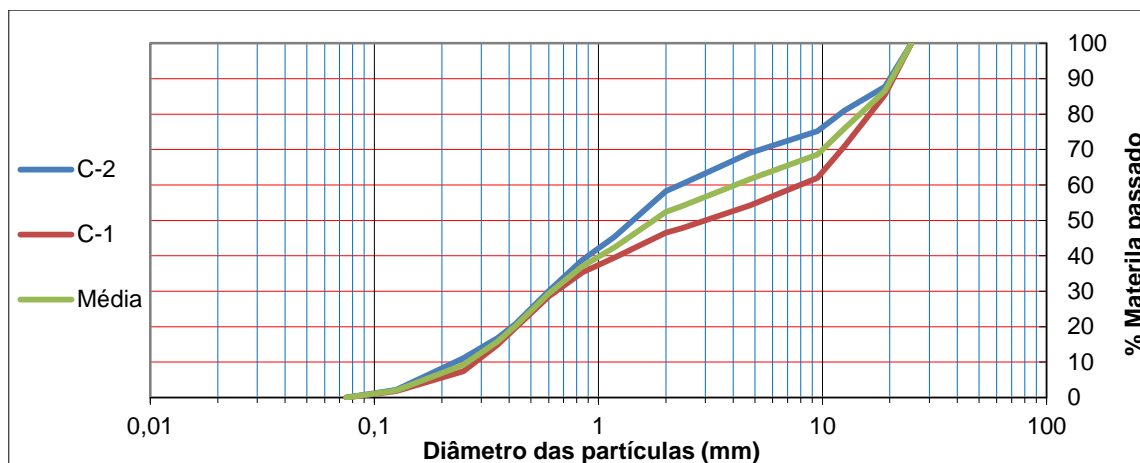


Figura 3.58 - Curva granulométrica da parede C da zona “Pilotos”

Por fim, e uma vez que as amostras retiradas de cada parede foram feitas com uma ordem pré determinada (amostra 1 num ponto superior da parede e amostra 2 num ponto inferior da parede, com exceção da parede C da zona “Pilotos” em que foram retiradas a uma altura semelhante) foi possível concluir que as amostras retiradas dos pontos 1 das paredes apresentavam percentagens inferiores de britas com dimensões superiores a 4 mm às amostras dos pontos 2 com a exceção da parede D da zona “Charneca” e da parede B da zona “Faculdade”. Esta observação pode levar a crer que havia uma certa preocupação de ter agregados de maiores dimensões nas bases das paredes de alvenaria.

Quadro 3.26 - Análise percentual da granulometria das paredes da zona “Pilotos”

	Britas		Areia			Silte	Argila	Parede - Amostra
			Grosseira	Media	Fina			
(mm)	>4	2<x<4	0,6<x<2	0,2<x<0,6	0,064<x<0,2	0,004<x<0,064	x<0,004	
%	39,7	10,3	39,97	10,01	2	0	0	A-1
	-	-	-	-	-	-	-	A-2
	47,8	5,7	17,9	21,7	6,9	0	0	C-1
	33,1	8,6	28,2	20,3	9,8	0	0	C-2

3.2.5. Porosidade aberta

Para análise dos valores de porosidade aberta das amostras em estudo, estas foram divididas em três grupos. O primeiro grupo corresponde às pedras (Quadro 3.27), o segundo às argamassas de cal aérea com agregados de componentes arenosas (Quadro 3.28) e o terceiro às argamassas de cal aérea com agregados de componentes argilosas (Quadro 3.29).

Ao serem analisados os valores da porosidade aberta das pedras, foi possível constatar o esperado, de que as pedras sedimentares calcárias são menos porosas do que as pedras sedimentares argilosas, diferindo em quase 25 % no seu valor médio de porosidade aberta, assim como as suas densidades (massas volúmicas) também as pedras calcárias são mais densas do que as argilosas. Também foi possível concluir que as amostras de pedras sedimentares argilosas que continham fósseis da arriba, eram menos porosas que aquelas que não continham fósseis. Estas amostras com fósseis apresentaram valores de porosidade aberta de 23,5 % em relação aos 36,1 % em média das pedras argilosas sem fósseis.

Quadro 3.27 – Porosidade aberta e massa volúmica das pedras

Classificação do material	Zona	Parede	Ponto da amostra	Massa volúmica [Kg/m³]	Porosidade aberta (%)	Pa - média por zona e material (%)	Pa - média de todas as zonas por material (%)
Pedra sedimentar argilosa com fósseis da arriba	Charneca	A	2	2016	14,7	24,9	23,5
		B	1	1554	33,0		
		B	2	1464	29,7		
		D	2	1946	22,3		
	Egas	A	1	1839	27,6	28,6	
		A	2	1687	29,2		
		A	2	1873	25,5		
		A	2	1880	29,9		
		B	1	2737	35,6		
		B	2	1757	23,6		
	Faculdade	B	1	2073	16,0	16,9	
		B	1	1952	17,7		
Seixo	Egas	A	1	2462	6,4	10,0	10,0
		C	1	2237	13,6		
Pedra sedimentar argilosa	Charneca	A	1	1478	33,9	36,2	36,1
		A	1	1463	37,5		
		A	2	1379	40,9		
		B	2	1555	32,0		
		C	1	1422	37,0		
	Vila Nova	A	2	1473	35,3	35,8	
		A	2	1314	35,9		
		A	2	1489	36,2		
Pedra sedimentar calcária	Charneca	B	1	1615	29,6	29,6	11,2
	Faculdade	A	2	2604	2,2	5,0	
		A	2	2511	4,9		
		A	2	2466	8,1		

Relativamente ao segundo grupo, das argamassas de cal aérea com agregados de componentes arenosas, os valores variam entre 29,0 % e os 36,4 %. Ao serem comparados os valores destas argamassas, tendo em conta os traços e a presença ou não de grumos de cal carbonatada, facilmente se percebe que não são só estas características que influenciam nos valores de porosidade aberta destas

argamassas, uma vez que estes valores não são proporcionais entre si. Da mesma forma, isto acontece também, com as argamassas de cal aérea com agregados de componentes argilosas, cujos valores de porosidade aberta variam entre 32,0% e 38,8%, tornando-se estas argamassas de difícil análise e comparação dentro de cada um dos diferentes grupos.

Quadro 3.28 - Porosidade aberta e massa volúmica das argamassas com agregados de componentes arenosas

Classificação do material	Zona	Parede	Ponto da amostra	Massa volúmica [Kg/m³]	Porosidade aberta (%)	Pa - média por zona e material (%)	Pa - média de todas as zonas por material (%)
Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas, traço fraco e com presença de grumos de cal carbonatada	Vila Nova	B	1	1319	37,8	35,4	35,4
		B	1	1365	34,2		
		B	1	1346	33,4		
		B	2	1398	33,9		
		B	2	1359	36,1		
		B	2	1308	37,2		
Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas e com adições pozolânicas de pó de tijolo, traço fraco	Pilotos	A	1	1983	36,0	33,5	33,5
		A	1	1529	34,0		
		A	1	1523	34,2		
		B	1	1559	32,4		
		B	1	1676	28,7		
		B	1	1517	35,8		
Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas, traço médio e com presença de grumos de cal carbonatada	Faculdade	A	1	1453	29,0	30,1	30,1
		A	1	1372	33,1		
		A	1	1336	38,6		
		B	2	1515	24,3		
		B	2	1524	27,9		
		B	2	1532	27,6		
Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosas, traço forte e com presença de grumos de cal carbonatada	Pilotos	C	2	1565	29,5	36,4	36,4
		C	2	1321	40,6		
		C	2	1459	34,7		
		E	2	1367	37,5		
		E	2	1319	39,8		
Argamassa de cal aérea com agregados de componentes arenosos, traço forte	Charneca	C	2	1638	30,5	29,0	29,0
		D	2	1485	33,7		
		D	2	1661	27,2		
		D	2	1686	24,8		

Apesar disto, pode-se observar nos valores dos dois quadros referentes às argamassas, que as argamassas com agregados de componentes arenosas na sua composição, apresentam em média, valores de porosidade aberta mais baixos do que as argamassas com agregados de componentes argilosas. Isto pode ser explicado devido à forma e tamanho dos agregados uma vez que os agregados de componentes arenosas possuem formas angulosas que se ligam mais fortemente ao ligante, comparando com as partículas argilosas que possuem formas mais arredondadas e assim realizam uma ligação mais fraca com o ligante, originando poros de maiores dimensões. A razão água/ligante

também é um factor a ter em conta, uma vez que já foi concluído em vários estudos, que a razão de água presente na argamassa deve ser mínima de modo a garantir as funções e propriedades pretendidas e ainda assim poder ter uma boa trabalhabilidade. Uma outra razão, também pode ser, a quantidade de ligante, já que nas argamassas de cal aérea quanto maior a quantidade de cal maior a porosidade desta [14] [27].

Quadro 3.29 - Porosidade aberta e massa volúmica das argamassas com agregados de componentes argilosas

Classificação do material	Zona	Parede	Ponto da amostra	Massa volúmica [Kg/m³]	Porosidade aberta (%)	Pa - média por zona e material (%)	Pa - média de todas as zonas por material (%)
Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas, traço fraco	Vila Nova	A	1	1393	32,0	32,4	32,4
		A	1	1472	31,6		
		A	1	1460	33,6		
Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas, traço médio e com grumos de cal carbonatada	Charneca	B	1	1775	34,9	36,7	36,7
		D	1	1628	46,9		
		D	1	1587	28,4		
Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas, traço médio e com presença de grumos de cal carbonatada	Pilotos	B	2	1457	33,2	36,1	36,1
		B	2	1299	39,3		
		B	2	1389	35,7		
Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas, traço forte, com presença de grumos de cal carbonatada e com adições pozolánicas de pó de tijolo	Pilotos	E	1	1299	37,7	38,8	38,8
		E	1	1349	39,1		
		E	1	1240	39,6		
Argamassa de cal aérea com terra	Pilotos	C	1	1555	25,1	23,7	23,7
		C	1	1617	21,1		
		C	1	1573	24,9		
Argamassa de cal aérea com agregados de componentes argilosas junta de pedra sedimentar calcária	Egas	B	2	1580	34,0	33,6	33,6
		B	2	1522	33,1		

Posto isto, é de extrema importância referir também que, existem diversos factores inerentes aos resultados obtidos, para além dos que já foram referidos até aqui. Factores como o tempo de vida da argamassa, a zona da qual esta foi retirada, a sua exposição a factores de deterioração, traços diferentes e não conhecidos, origem dos agregados e ligantes, etc. influenciam sobremaneira os resultados obtidos.

3.2.6. Determinação da profundidade de carbonatação

O processo de carbonatação é caracterizado pela difusão molecular de gases, devido à diferença de concentração entre o dióxido de carbono na atmosfera ambiente e o dióxido de carbono no interior das argamassas. De acordo com a equação química descrita em 3.1.9 (Equação 3.4) há uma difusão molecular regida pela combinação do dióxido de carbono com o hidróxido de cálcio. Outro aspecto a ter em referência é a relação da carbonatação com a humidade relativa da atmosfera ambiente e com a porosidade do material. A humidade relativa tem uma influência significativa na hidratação das argamassas enquanto que a porosidade influencia a quantidade de humidade retida pelo material [15]. Existe carbonatação máxima para valores de humidade relativa entre os 50 e os 70 %, como mostra a Figura 3.59.

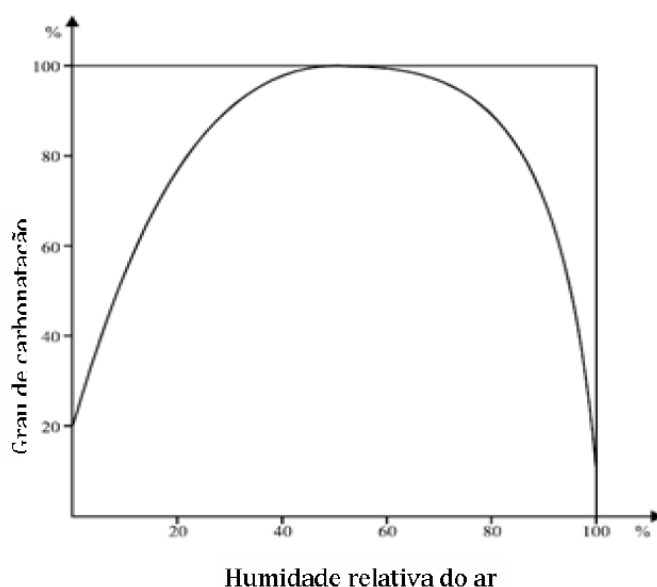


Figura 3.59 – Grau de carbonatação em função da humidade relativa do ambiente [43]

O ensaio foi realizado com base no indicado no ponto 3.1.9, com vista a saber se as argamassas presentes nas paredes de alvenaria das diferentes zonas estariam ou não carbonatadas.

A aspersão de solução alcoólica de fenolftaleína foi realizada por duas vezes com um intervalo de 72h para garantia de um resultado fiável. Após 24h depois da segunda aspersão, foi visível que apenas uma das sete amostras de argamassa em ensaio, mostrou mudança de cor, apresentando um tom mais avermelhado como visível na Figura 3.60.



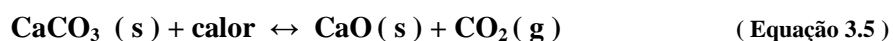
Figura 3.60 – Amostras ensaiadas na determinação da existência de carbonatação. (Amostras antes do ensaio são apresentadas à esquerda e à direita são apresentadas as amostras depois do ensaio)

A amostra que mostrou a mudança de cor pertence às paredes de alvenaria da zona “Moinho”, mais concretamente do ponto 1 da parede 2. Este resultado prova que a argamassa cuja tonalidade se tornou avermelhada, depois da aspersão de fenolftaleína, apresenta áreas de argamassa não carbonatadas ao contrário das restantes que se apresentam totalmente carbonatadas.

De referir, que este ensaio não foi realizado logo após recolha das amostras *in situ*, o que pode ter tido influência no resultado final do ensaio uma vez que, como referido em 3.1.9, a humidade relativa, temperatura e a concentração de dióxido de carbono na atmosfera têm influência na carbonatação das argamassas.

3.2.7. Análise termo gravimétrica

A análise termo gravimétrica é um dos métodos mais utilizados para a determinação da quantidade de material carbonatado, bem como para determinar o teor de Ca(OH)_2 na argamassa. Os gráficos obtidos desta análise, termogramas ou curvas termo gravimétricas, apresentam a variação de massa em ordenadas e a temperatura de aquecimento em abcissas. Após a introdução das amostras na termo balança, o ensaio é iniciado, aumentando assim a temperatura, o que se pode traduzir quimicamente pela seguinte equação denominada por descarbonatação:



Sabendo a massa total inicial das amostras e sabendo a massa molecular dos compostos, é possível, através da análise dos gráficos, nos quais se consegue saber as percentagens de massa perdida pela amostra, em função da temperatura, conhecer a quantidade de carbonato de cálcio existente na amostra e assim poder-se aferir o traço das duas argamassas de cal aérea em estudo.

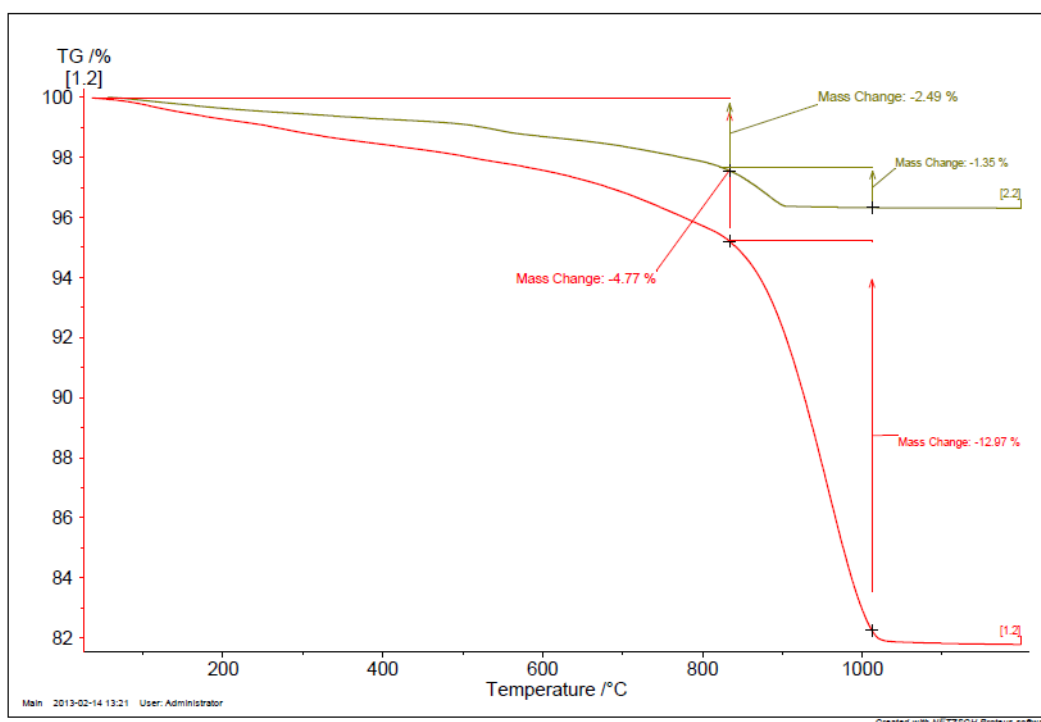


Figura 3.61 – Curvas termo gravimétricas das argamassas. (Curva verde - Cal aérea sem grumos de cal carbonatada; Curva vermelha – Cal aérea com grumos de cal carbonatada)

Através de estudos já realizados e catalogados, sabe-se a que compostos se devem a perda de massa de uma amostra a uma determinada temperatura.

As perdas de massa entre dois patamares correspondem às quantidades de produtos de reação voláteis, como por exemplo água, dióxido de carbono e trióxido de enxofre. A partir destas podem obter-se os dados quantitativos sobre a composição da amostra. A quantidade de água presente num material, normalmente é a causa da primeira perda de massa visível na curva termo gravimétrica, podendo ser calculada a partir da secção descendente da curva. As perdas de massa por desidratação ocorrem habitualmente abaixo dos 200 °C, podendo-se verificar isto mesmo na Figura 3.62, na qual as curvas apresentam picos de perda de massa aos 119,2 °C e aos 160,4 °C para a argamassa de cal aérea com grumos de cal carbonatada e para a argamassa de cal aérea sem grumos de cal, respectivamente. Para além da desidratação do material, também pode haver a perda de água de minerais que contêm o grupo hidroxilo (OH) na sua estrutura, fenómeno este chamado de desidroxilação e que ocorre a temperaturas mais elevadas que a desidratação. Temperaturas estas que se podem situar geralmente entre os 300 e os 450 °C, contudo, existem alguns casos, em que essas temperaturas podem ser na ordem dos 800 °C, como é o caso por exemplo dos minerais de argila, clorites e micas. Relativamente a estas temperaturas não foram identificados nenhuns patamares que se achasse de relevo para a análise destas argamassas.

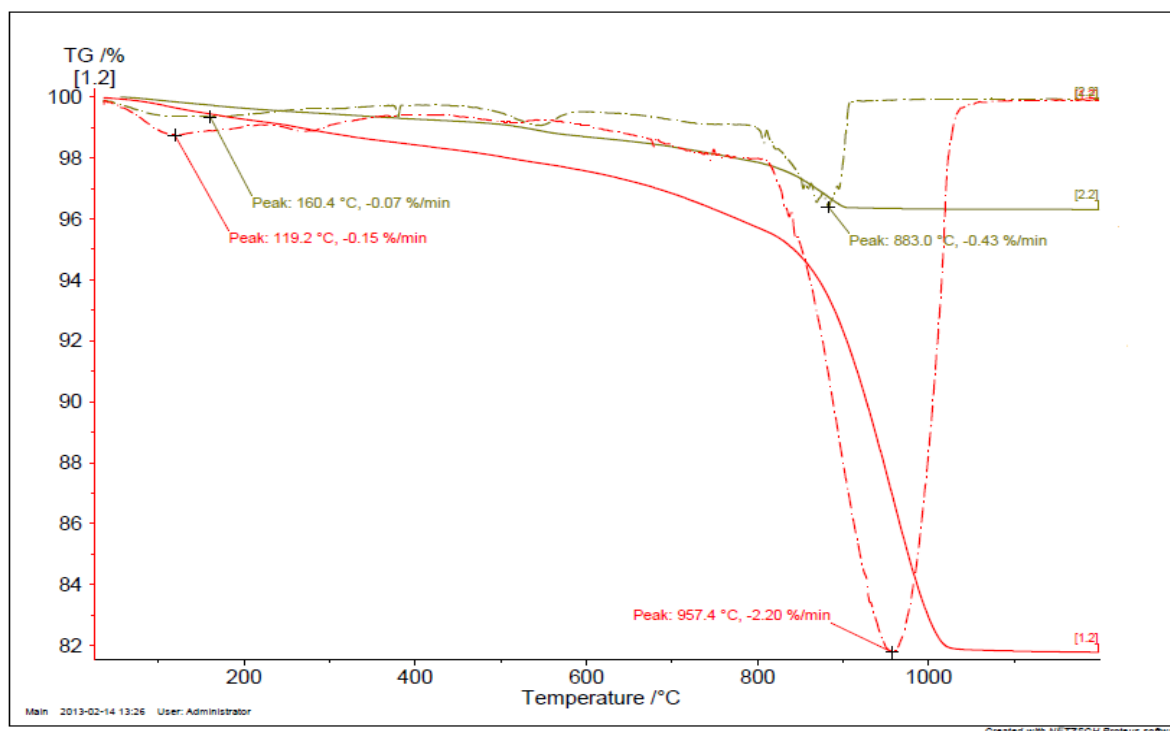


Figura 3.62 - Curvas termo gravimétricas e derivadas, das argamassas. (Curva verde - Cal aérea sem grumos de cal carbonatada; Curva vermelha – Cal aérea com grumos de cal carbonatada)

Quanto ao dióxido de carbono, porventura o elemento mais importante, proveniente da reacção endotérmica, é formado pela descarbonatação dos carbonatos, neste caso, o carbonato de cálcio (CaCO_3). A reacção de descarbonatação é caracterizada por ser rápida e completa, facilitando assim a obtenção de valores a partir das curvas termo gravimétricas. Esta reacção ocorre normalmente acima dos 800 °C e não costuma estar concluída até ao término do ensaio. Através da Figura 3.62 é possível observar os picos em que existe a perda de massa referentes à perda de dióxido de carbono. O pico para a cal aérea com grumos de cal carbonatada acontece aos 957,4 °C enquanto que o pico referente à cal aérea sem grumos de cal carbonatada acontece aos 883 °C.

Uma vez que, o estado de carbonatação das referidas amostras, já tinha sido verificado recorrendo à aspersão de fenolftaleína, este estudo centrou-se na averiguação da quantidade de CaCO_3 existente em cada amostra de argamassa de modo a aferir os seus respectivos traços. Para isso, foi necessário recorrer à análise da curva termo gravimétrica da Figura 3.61 de modo a se saber a percentagem da perda de massa referente ao dióxido de carbono.

Quadro 3.30 – Massas molares das moléculas

Molécula	Massa Molar (g/mol)
CaCO_3	100,089
CaO	56,079
CO_2	44,01

Quadro 3.31 – Quadro resumo referente ao ensaio da argamassa de cal aérea com grumos de cal carbonatada

Massa inicial	1702	mg
Cor no gráfico	vermelho	
Instrumento de ensaio	NETZSCH STA 449F3	
perda de massa entre os 0 e 800 °C	4,77%	
entre os 100 e 200° devido à perda de água		
picos de maior perda de massa	119,2°C; - 0,15%/min	
	957,4°C; - 2,20%/min	
perda de massa entre os 800 e 1198,26 °C	12,97	%
perda de massa devido à perda de CO ₂		
12,97% de 1702 mg	220,749	mg
massa de CaCO ₃	502,036	
massa de CaO	281,286	

Sabendo o valor da massa perdida de CO₂ e através da relação química expressa na equação 3.5 calculou-se a massa de carbonato de cálcio presente em cada uma das argamassas. Ao ser feito o estudo das curvas da Figura 3.61, pôde-se constatar que houve uma perda de massa de 12,97% para a argamassa de cal aérea com grumos de cal carbonatada e de 1,35% para a argamassa de cal aérea sem grumos de cal carbonatada. Através destas percentagens das perdas de massa de dióxido de carbono das respectivas amostras foi feito o cálculo de forma a obter a massa de CaCO₃. Os resultados são apresentados nos Quadros 3.31 e 3.32.



Figura 3.63 - Amostra de argamassa de cal aérea com grumos de cal carbonatada

Através do exposto no Quadro 3.31, pode-se concluir que da amostra inicial de cal aérea com grumos de cal carbonatada (Figura 3.63) com 1702 mg de massa iniciais, existe 502,036 mg de CaCO₃, dos quais 281,286 são CaO e os restantes 220,749 mg correspondem ao CO₂ perdido durante o período em que a temperatura esteve entre os 800 e os 1198,26 °C.

Quadro 3.32 - Quadro resumo referente ao ensaio da argamassa de cal aérea sem grumos de cal carbonatada

Quadro Resumo referente ao ensaio da argamassa de cimento com grãos de carvão		
Massa inicial	1897	mg
Cor no gráfico	verde	
Instrumento de ensaio	NETZSCH STA 449F3	
perda de massa entre os 0 e 800 °C	2,49%	
entre os 100 e 200° devido à perda de água		
picos de maior perda de massa	160,4°C; - 0,07%/min	
	883°C; - 0,43%/min	
perda de massa entre os 800 e 1198,26 °C	1,35	%
perda de massa devido à perda de CO ₂		
1,35% de 1897 mg	25,610	mg
massa de CaCO ₃	58,242	
massa de CaO	32,632	

Relativamente ao Quadro 3.32 pode-se concluir que da amostra inicial de cal aérea sem grumos de cal carbonatada (Figura 3.64) com 1897 mg de massa iniciais, existe 58,242 mg de CaCO₃, dos quais 32,633 são CaO e os restantes 25,609 mg correspondem ao CO₂ libertado durante o período em que a temperatura esteve entre os 800 e os 1198,26°C.

Tendo em conta a equação química (Equação 3.5) e o Quadro 3.30 é esperado que quanto maior for a perda de massa, referente à libertação de dióxido de carbono, maior será a quantidade de carbonato de cálcio existente e assim, mais forte o traço da argamassa.

Os valores obtidos indicam que a amostra de argamassa de cal aérea que continha grumos de cal carbonatada na sua composição, apresentava maior perda de massa referente ao dióxido de carbono, maior massa de carbonato de cálcio (CaCO₃) e também de CaO relativamente à argamassa de cal aérea sem grumos de cal carbonatada. Assim sendo, pôde-se concluir que a argamassa de cal aérea com grumos de cal carbonatada apresenta um traço mais forte.



Figura 3.64 – Amostra de argamassa de cal aérea sem grumos de cal carbonatada

É importante referir, que este ensaio, apesar de ser realizado recorrendo a tecnologia relativamente moderna, também poderá evidenciar alguns factores de erro nas medições termo gravimétricas. Alguns desses factores são:

- instabilidade na atmosfera no porta-amostras
- turbulência e correntes de convecção no forno
- flutuações aleatórias no equipamento de registo e na balança
- efeito de indução no forno
- efeitos electrostáticos no mecanismo da balança
- condensação no suporte da amostra
- medida de temperatura e calibração
- calibração de massa
- reacção da amostra com o porta-amostras
- flutuações de temperatura [29].

3.2.8. Porometria

O ensaio de porometria por intrusão de mercúrio permitiu avaliar a estrutura microporosa das argamassas ensaiadas, nomeadamente em termos de áreas e volumes dos poros. Foram ensaiados seis materiais diferentes de modo a conhecer-se as características dos poros existentes nos materiais presentes nas paredes de alvenaria antiga em estudo. Os materiais ensaiados foram:

- argamassa de cal aérea com adições pozolânicas (pó de tijolo)
- argamassa de cal aérea (traço mais forte)
- argamassa de cal aérea (traço mais fraco)
- elemento cerâmico
- pedra sedimentar argilosa
- pedra sedimentar calcária.

Apesar de este ensaio ser realizado em instrumentos sofisticados, é necessário referir novamente, que continua a existir uma margem de erro associada ao ensaio. Isto acontece, como referido no ponto 3.1.7, devido à existência de poros cuja dimensão é superior aos seus canais de acesso, fazendo com que os resultados apresentados não correspondam aos valores reais, sendo necessário a realização de uma interpretação cuidada desses mesmos resultados.

De seguida serão apresentadas curvas representativas da intrusão cumulativa e incremental de mercúrio, quer em percentagens quer em ml/g, em função do diâmetro dos poros representado em micrómetros.

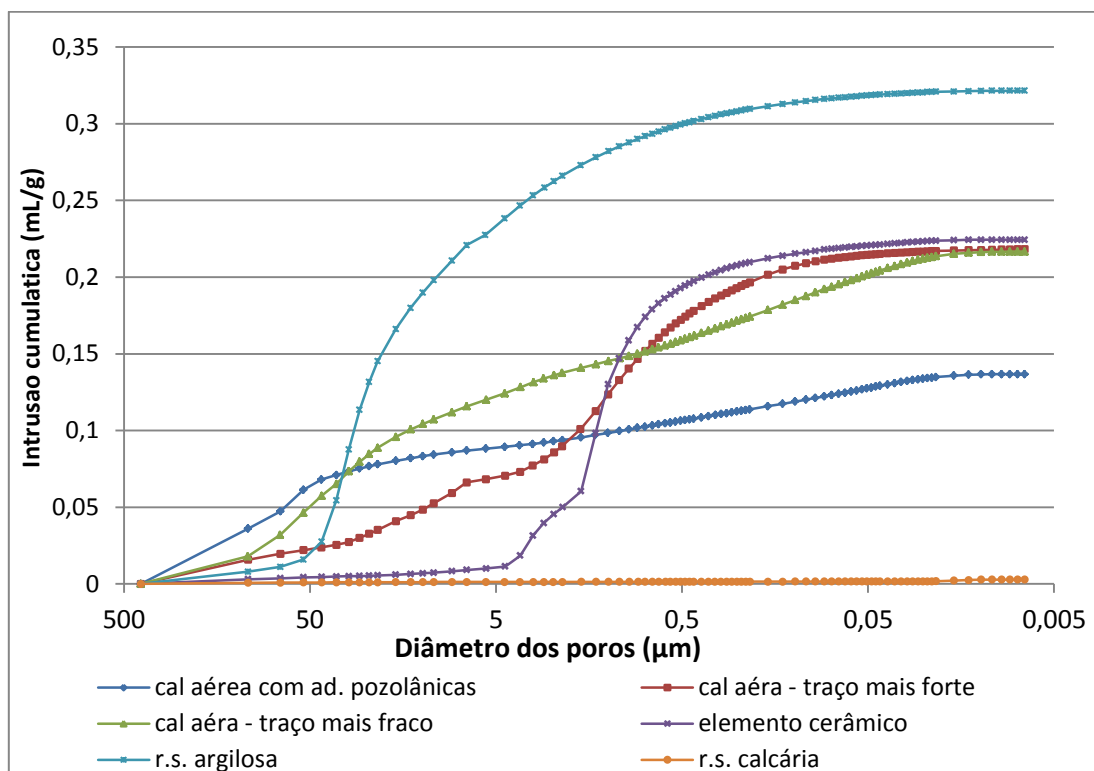


Figura 3.65 - Curvas de intrusão cumulativa de mercúrio em ml/g dos materiais

A Figura 3.65 representa a intrusão cumulativa de mercúrio em ml/g enquanto que a Figura 3.66 apresenta a mesma intrusão de mercúrio (cumulativa) mas representada percentualmente. Analisando a Figura 3.65 pode-se verificar que a pedra sedimentar argilosa é o material no qual foi introduzido uma maior quantidade de mercúrio ao contrário da pedra sedimentar calcária a qual foi a que menos quantidade de mercúrio recebeu. Relativamente às argamassas, pode-se afirmar que tanto a argamassa de cal aérea, com traço mais forte, quer a de traço mais fraco, receberam a mesma quantidade de mercúrio introduzido, contudo, a gama de valores em que foi introduzido mais mercúrio difere. Este facto é mais facilmente visualizado na Figura 3.67, onde se pode verificar os picos de intrusão de mercúrio nos diferentes materiais. De notar que as argamassas têm a característica de possuírem uma distribuição dos poros bi – modal, apresentando dois picos na curva de intrusão incremental de mercúrio.

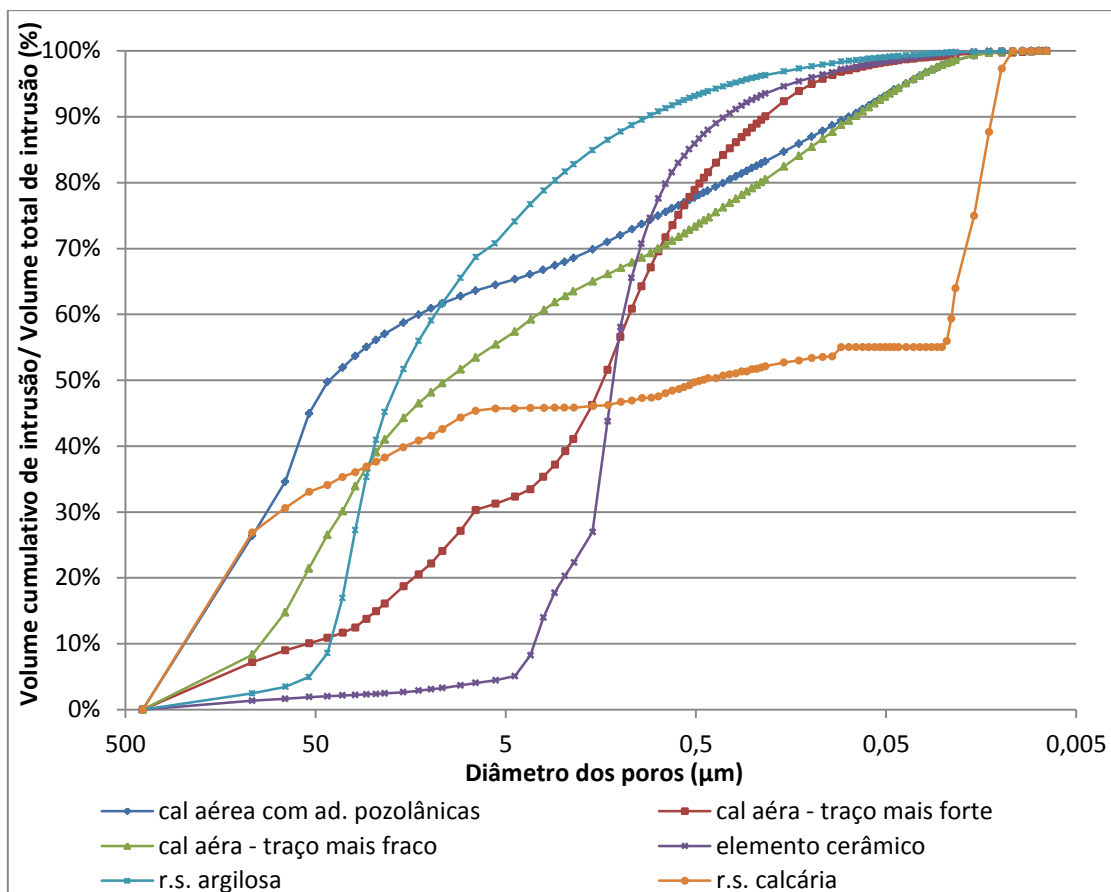


Figura 3.66 - Curvas de intrusão cumulativa de mercúrio em percentagem dos materiais

A argamassa de cal aérea com traço mais forte recebe maior quantidade de mercúrio, 7,21% e 5,13% do total, nos poros com diâmetros de 107,82 μm e 1,75 μm . Pode-se afirmar também, que a argamassa de cal aérea com traço mais fraco de ligante, apresenta uma maior quantidade de poros de maiores dimensões comparando com a argamassa com traço mais forte. Na argamassa de cal aérea com adições pozolânicas (pó de tijolo), de acordo com a Figura 3.66, 50% do volume total de mercúrio introduzido foi efectuado em poros entre os 50 μm e os 500 μm , facto este mostrado também na Figura 3.67, onde se pode ver o pico da curva, referente ao elemento cerâmico, atingir os 26% do total de volume introduzido em poros com diâmetros de 107 μm .

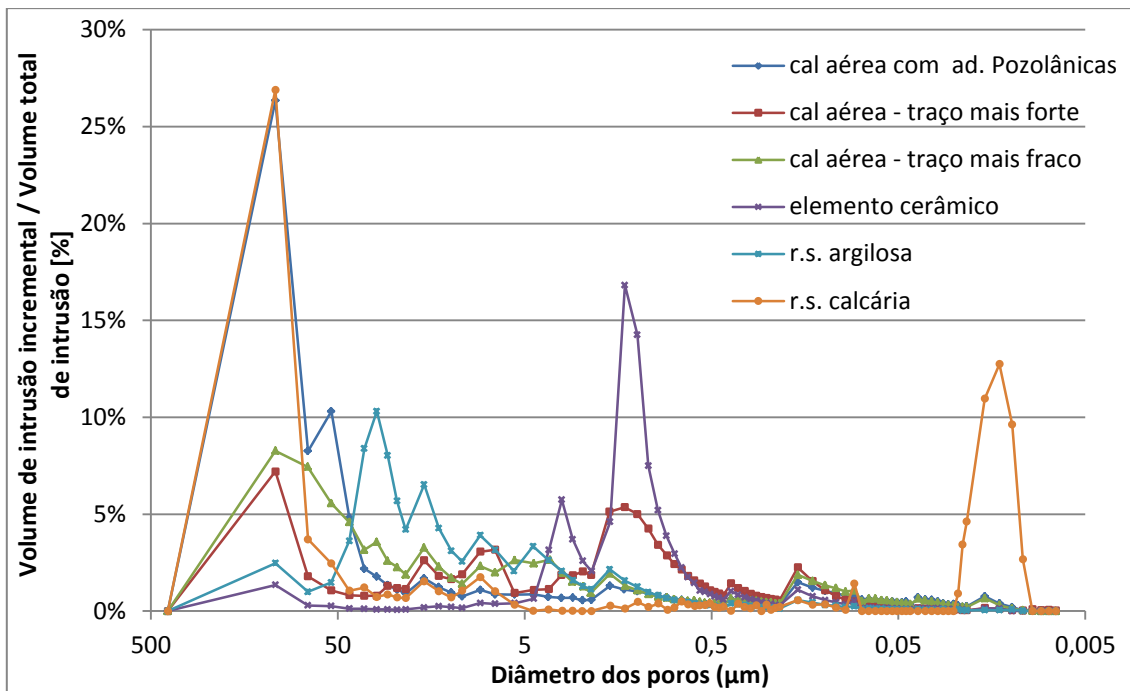


Figura 3.67 Curvas de intrusão incremental de mercúrio em porcentagem dos materiais

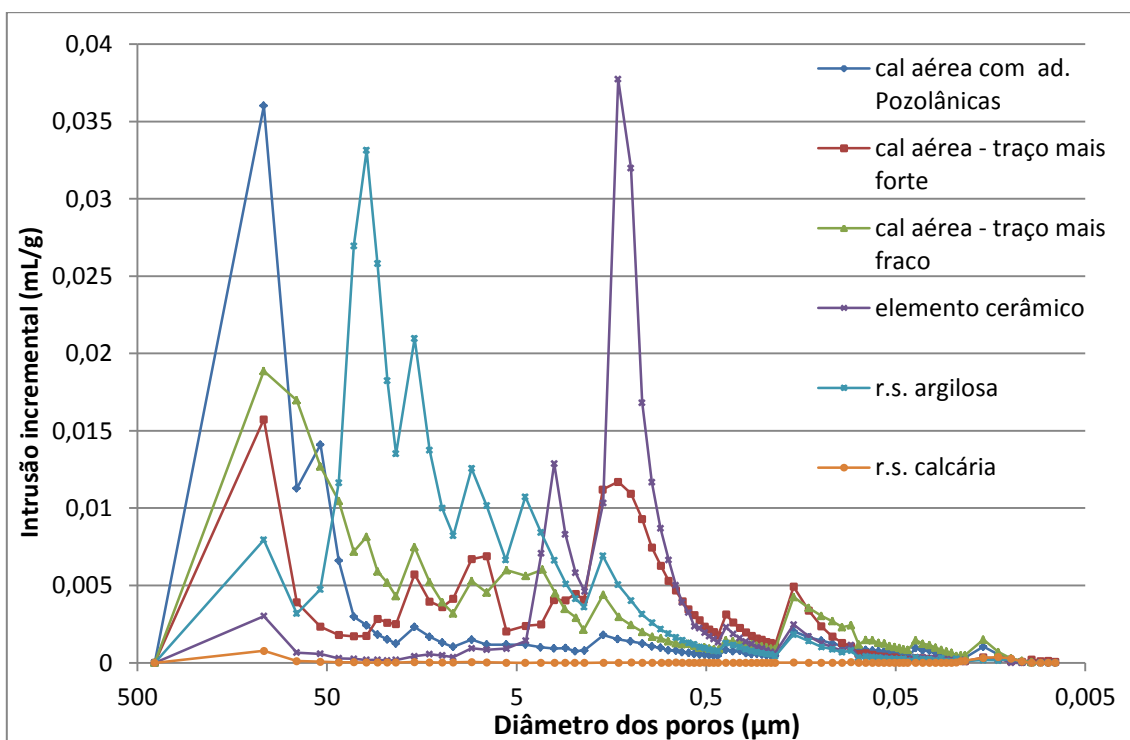


Figura 3.68 - Curvas de intrusão incremental de mercúrio em ml/g dos materiais

Finalmente, a amostra de elemento cerâmico (tijolo), como visível na Figura 3.66, apresenta na sua maioria, poros com diâmetros compreendidos entre os 0,5 μm e os 5 μm . Neste material houve a introdução total de 0,224 ml/g de mercúrio (Figura 3.65), sendo que a maior porcentagem de mercúrio introduzido se verificou nos poros com 1,45 μm (16,82%) (Figura 3.67).

Através da Figura 3.68 pode-se verificar quais os valores dos diâmetros existentes em maior quantidade, isto é possível uma vez que se pode ler no gráfico a quantidade de mercúrio introduzido em cada um dos diâmetros existente. As cais aéreas, nomeadamente a cal aérea com adições pozolânicas, com traço mais fraco e por fim a com traço mais forte apresentam, em maioria, poros com diâmetros de 107 μm . O elemento cerâmico tem maioritariamente poros cujas dimensões diametrais rondam o valor de 1,46 μm enquanto que as pedras sedimentares apresentam poros de 30,93 μm e 0,017 μm de diâmetro, para a argila e calcário respectivamente.

De acordo com Rato (2006), o excesso de água de amassadura, face à necessária para o endurecimento do ligante e/ou a quantidade de ar emulsionado no processo da amassadura, são razões para a existência dos poros de maiores dimensões na matriz de ligante [42]. Rato (2006) afirma também que relativamente à porosidade de interface, obtêm-se poros de menores dimensões ao utilizar agregados mais finos, mas que como estes, agregados mais finos, têm superfície específica maior, os poros de interface serão em maior quantidade [42]. Este tipo de porosidade caracteriza a conexão entre ligante e agregados.

É também visível na Figura 3.68 que a argamassa de cal aérea com adições pozolânicas (pó de tijolo), comparando com as restantes argamassas, é a argamassa que tem uma curva com maior pico relativamente ao volume de mercúrio introduzido, para o mesmo valor de diâmetro de poros. O volume de mercúrio introduzido é de 0,036 ml/g, comparativamente aos 0,019 e 0,016 ml/g para a argamassa com traço mais fraco e traço mais forte respectivamente, sendo esse valor substancialmente maior.

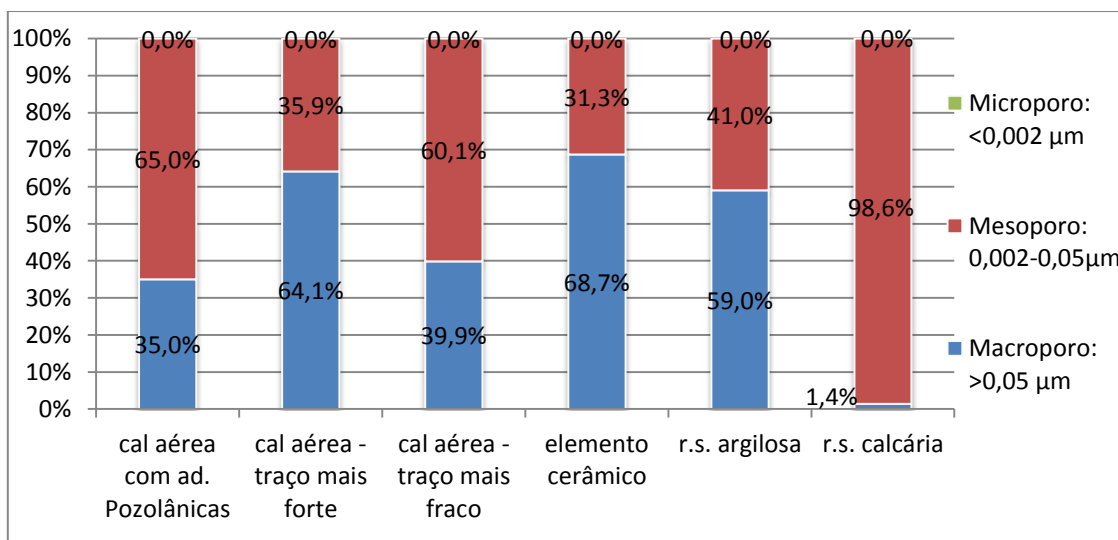


Figura 3.69 – Classificação segundo a dimensão dos poros dos materiais

Contudo, apesar de a argamassa de cal aérea com adições pozolânicas ter o maior volume de mercúrio introduzido, para um determinado valor de diâmetro dos poros, não é a argamassa com maior percentagem de macroporos (poros com dimensões superiores a 0,05 μm). Conforme se pode ver na

Figura 3.69 é a argamassa de cal aérea com traço mais forte que apresenta maior percentagem de poros de grandes dimensões (64,1 %). Relativamente às pedras sedimentares, como esperado, a pedra calcária não apresenta macroporos na sua constituição, sendo os seus poros na sua maioria mesoporos enquanto que a pedra argilosa apresenta dimensões de poros mais variadas, tendo 41 % de mesoporos e 59 % de macroporos. O elemento cerâmico é o material que apresenta maior quantidade de poros de grandes dimensões (68,7 %).

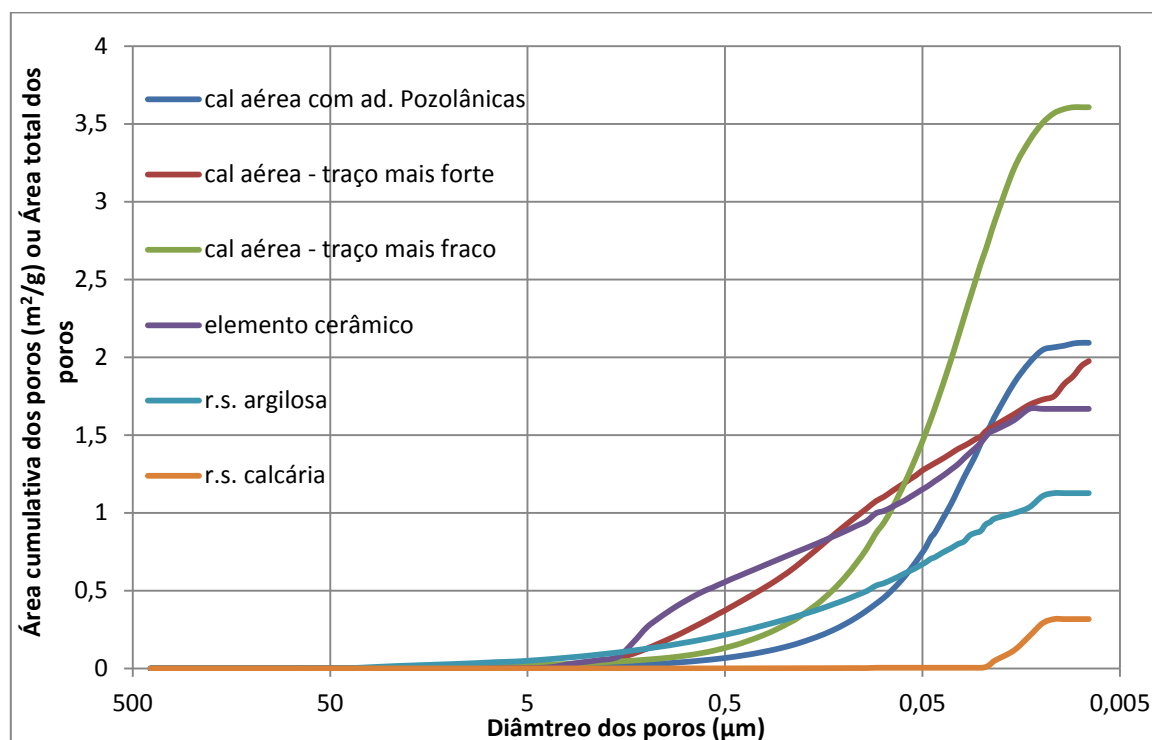


Figura 3.70 – Área porosa dos materiais

Analisando as curvas cumulativas das áreas dos poros, na Figura 3.70, pode-se afirmar que o material com maior área total de poros é a argamassa de cal aérea com traço mais fraco ($3,6 \text{ m}^2/\text{g}$) seguindo-se a cal aérea com adições pozolânicas ($2,09 \text{ m}^2/\text{g}$) e por fim a argamassa de cal aérea com traço mais forte ($1,94 \text{ m}^2/\text{g}$).

Segundo alguns autores, nas argamassas de cal, englobando a argamassa de cal aérea, o volume de poros aumenta com a relação água / ligante, sendo os valores diametrais mais frequentes entre 0,5 e 1 μm em função da referida relação [18], o qual não se verificou nestes ensaios. De referir, que as argamassas em estudo, têm já largos anos de existência, durante os quais estiveram sujeitas a processos de carbonatação. Durante a carbonatação das argamassas de cal, os poros com diâmetros superiores a 0,1 μm , diminuem de tamanho, devido ao volume de calcite ser superior ao de portlandite, enquanto que os poros de diâmetros inferiores a esse valor não participam na carbonatação durante o primeiro ano [18].

As pedras sedimentares como esperado apresentam as menores áreas totais de poros, 1,12 m²/g para a pedra argilosa e 0,31 m²/g para a pedra calcária. Quanto ao elemento cerâmico este situa-se num patamar entre as argamassas e as pedras, apresentado um valor de 1,66 m²/g.

Quadro 3.33 – Volume de mercúrio introduzido por tipo de poro em mL/g

	cal aérea com ad. pozolânicas	cal aérea - traço mais forte	cal aérea - traço mais fraco	elemento cerâmico	r.s. argilosa	r.s. calcária
Vol. Mercúrio [mL/g]: Macroporos (>0,05µm)	2,05	3,32	3,94	2,85	1,69	0,0
Vol. Mercúrio [mL/g]: Mesoporos (0,002-0,05µm)	3,93	1,83	6,35	1,57	1,33	0,58
Vol. Mercúrio [mL/g]: Microporos (<0,002µm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total Intrusion Volume (mL/g)	5,98	5,15	10,29	4,42	3,02	0,58

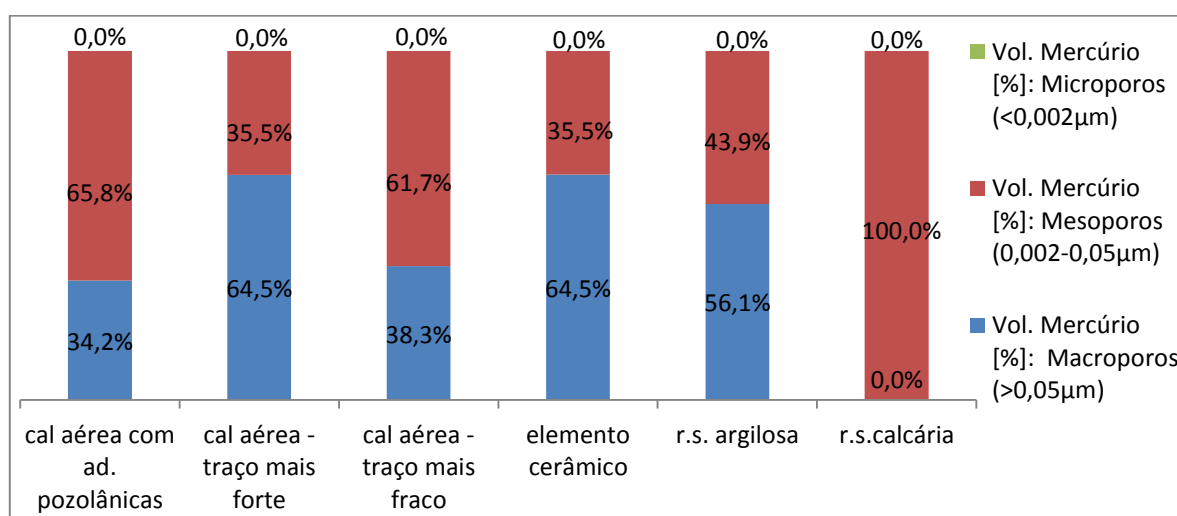


Figura 3.71 - Volume de mercúrio introduzido por tipo de poro em percentagens

O volume de mercúrio introduzido nos diferentes tamanhos de poros classificados anteriormente assim como o volume total introduzido durante o ensaio é apresentado no Quadro 3.33 e na Figura 3.71 também, com o pormenor de ser apresentado em percentagens. Ao analisar-se a referida figura, é verificado que, o mercúrio foi maioritariamente introduzido nos mesoporos e nos macroporos, com dimensões entre os 0,002 e os 0,05 µm e acima dos 0,05 µm. Para além disto pode-se verificar que o material em que foi introduzido maior volume de mercúrio foi a argamassa de cal aérea com traço mais fraco, indo de encontro com o concluído através da Figura 3.70, onde se pode observar que a referida argamassa é o material com maior área de poros.

De notar também, que tendo como referência a classificação do tamanho dos poros quanto ao seu diâmetro da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), os materiais em estudo não apresentam poros com dimensões inferiores a 0,002 μm (microporos).

4. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este trabalho teve como objectivo contribuir para um conhecimento mais profundo das paredes de alvenaria antiga (de pedra), uma vez que a informação disponível, sobre este tipo de paredes, ainda é escassa. Para além de um conhecimento mais aprofundado sobre as paredes de alvenaria de pedra, serviu também, para que se ficasse com um melhor conhecimento sobre técnicas de diagnóstico e avaliação do estado de alvenarias, assim como os “*outputs*” de cada uma dessas técnicas. Tentou-se também, que servisse como alerta, para a importância de uma boa escolha das técnicas para os diferentes tipos de situação encontrados nas paredes de alvenaria antiga, quer em construções de qualidade, quer em edifícios de características simples.

Concluiu-se que as técnicas de construções de alvenarias são bastante peculiares e que o seu conhecimento e estudo são de relevante importância sobretudo porque a tendência actual é a de reabilitar edifícios de alvenaria antiga, em detrimento de novas construções. Este trabalho pôde também averiguar que as paredes de alvenaria de pedra antigas demonstram uma heterogeneidade de materiais, assim como uma padronização quanto à sua construção, técnicas, características, origens e outros pormenores tanto dos materiais como da forma de execução da parede em si.

Registe-se também que os procedimentos experimentais permitiram concluir que:

- as alvenarias estudadas apresentam em maior quantidade pedras calcárias, argilosas e argamassas de cal aérea;
- as paredes de alvenaria de pedra estudadas têm poucos vazios, os quais, na sua maioria, são de dimensões bastante reduzidas (0 a 4 cm²);
- eram utilizados, para a construção destas alvenarias estudadas, agregados com diâmetros superiores a 4mm (seixos) misturados com a argamassa por forma a preencher o espaço e reduzir a quantidade de argamassa a utilizar;
- nas argamassas das alvenarias em estudo, predomina o agregado grosseiro (areia grosseira, 0,6 a 2 mm);
- as argamassas com agregados de componentes arenosas apresentam, em média, valores de porosidade aberta mais baixos que as argamassas com agregados de componentes argilosas;
- a maioria das argamassas das presentes alvenarias, apresentavam-se carbonatadas;
- a argamassa de cal aérea com grumos de cal carbonatada, apresentou maior perda de massa referente ao dióxido de carbono, maior massa de carbonato de cálcio e também de óxido de cálcio, comparando com a argamassa de cal aérea sem grumos de cal carbonatada;
- a argamassa de cal aérea com grumos de cal carbonatada tem traço mais forte relativamente à argamassa sem grumos de cal carbonatada;

- as pedras calcárias apresentam menores áreas totais de poros em comparação com as pedras argilosas;
- segundo a classificação da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), nenhum dos materiais apresenta microporos;
- a argamassa de cal aérea com traço mais forte apresenta maior percentagem de macroporos, ao contrário da argamassa de cal aérea com adições pozolânicas cuja percentagem é a menor, tendo em conta que ambas tem aproximadamente a mesma área total de poros;
- a argamassa de cal aérea com traço mais fraco é o material com maior área total de poros.

Futuramente, em forma de complemento deste trabalho, acha-se porventura interessante, realizar uma base de dados englobando todos os diferentes tipos de paredes de alvenaria antigas, contento informações, tanto da importância e das características das alvenarias como realizado neste trabalho, como também das zonas em que as alvenarias se inserem (acções meteorológicas, fenómenos de degradação, actividade sísmica, materiais existentes) e relacionando essas informações com as respectivas técnicas de diagnóstico estrutural e técnicas de reabilitação estrutural.

Também é importante a realização de uma caracterização mecânica das paredes de alvenaria de pedra, de modo a aumentar o conhecimento sobre as suas características e comportamento estrutural. Para esta caracterização mecânica das alvenarias de pedra sugere-se, para além de ensaios com macacos planos, a realização de ensaios de compressão e medições de vibração forçada às alvenarias, podendo assim perceber-se o comportamento das alvenarias de pedra perante solicitações deste género. Sendo de interesse o estudo deste género de alvenarias, aconselha-se o corte e transporte para laboratório de alguns troços de alvenarias de pedra, quando possível, de modo a ser realizado uma campanha de caracterização mecânica mais realista e eficiente.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] - ALGARVIO, M.P. -Influência da razão água/ligante nas características das argamassas de cal aérea para rebocos de edifícios antigos. Dissertação de Mestrado pelo IST, 2010
- [2] – ALMEIDA C., GUEDES J. P., ARÊDE A., COSTA C.Q., COSTA A. - Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls. Construction and building materials, Volume 30, pág. 188-197, 2012
- [3] - ANZANI, A.; BARONINO, G.; BINDA, L. – Multiple Leaf Stone Masonry as a Composite: The Role of Materials on its Behavior and Repair, Studies on the Mechanical Behaviour of Masonry and Masonry Structures, Vol. IV, pp. 1473-1508, 2001
- [4] - ARANDIGOYEN, M.; ALVAREZ, J. I. - Pore structure and Mechanical properties of cement-lime mortars. Cement and Concrete Research, Volume 37, pág. 767-775. Elsevier, 2007.
- [5] – ARÊDE, A., COSTA, A. – Inspeção e diagnóstico estrutural de construções históricas. Actas do seminário “A intervenção no património”. Práticas de conservação e reabilitação, FEUP, pág.55-88, Porto 2002
- [6] – BANDEIRA, A. - Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino - Evolução com a idade. Dissertação de Mestrado em engenharia civil pela FCT-UNL. Lisboa, Dezembro 2012
- [7] – BARONIO G., BINDA L., TEDESCHIO I., TIRABOSCHI C. - Characterization of the materials used in the construction of the Noto Cathedral. Construction and building materials, Volume 17, pages 557-571, 2003
- [8] – BINDA L., CARDANI G. , SAISI A., VALLUZI M.R. - Vulnerability analysis of the historical buildings in Seismic area by a multilevel approach. Asian Journal of Civil Engineering, Volume 7, No. 4, 2006
- [9] – BINDA L., MODENA C., BARONIO G., ABBANESE S. - Repair and investigation techniques for stone masonry walls. Construction and building materials, Volume 11, nº3, pág. 133-142, 1997
- [10] – BINDA L., SAISI A. - Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. Construction and building materials, volume 14, pág. 199-233, 2000
- [11] - BINDA L., SAISI A. - Non destructive testing applied to historic buildings: The case of some Sicilian Churches. Historical Constructions, pág. 29-46, 2001

- [12] – BINDA L., SAISI A. - State of art of research on historic structures in Italy. Proceedings of 11th Advanced Research Initiation Assisting and Developing Networks in Europe (ARIADNE) workshop, May 20-26, 2002
- [13] – BINDA L., SAISI A., TIRABOSCHI C. - Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. Construction and building materials, Volume 14, pág.199-233, 2000
- [14] – BOTAS, S. -Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios. Dissertação de Mestrado pela FCT-UNL, pág 12, 2009
- [15] – CADORE, W. – Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com alto teores de adições minerais e cal hidratada. Dissertação de Mestrado em engenharia civil- UFSM. Santa Maria, 2008
- [16] – CARVALHO, F. – Avaliação numérica da relação entre as propriedades mecânicas da alvenaria de pedra e as dos seus constituintes, para acções verticais. Dissertação de Mestrado em engenharia civil pela FEUP. Porto, 2011
- [17] - CHATTERJI, S. - Freezing of air-entrained cement-based materials and specifications of air-entraining agents. Cement and Concrete Research, Volume 25, pág.759-765. Elsevier, 2002.
- [18] - CINCOTTO M. A., REPETTE W. L., QUARCIONI V. A., JOHN V. M. - O Efeito da Carbonatação na Porosidade de Argamassas de Cimento, Cal e Cimento. 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, Lisboa 2010
- [19] – COLLET, F., BART, M., SERRES, L., MIRIEL, J. - Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials. Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 6, Pages 1271–1280, June 2008
- [20] – COUTINHO, J. S. – Agregados para argamassas e betões. Materiais de Construção I, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999
- [21] - DEC / UNL – Fichas de ensaio – Pedras naturais e artificiais. Determinação da massa volúmica. Fe 01. Caparica: FCT / UNL, 1996
- [22] – DEC / UNL – Fichas de ensaio – Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta. Fe 02. Caparica: FCT / UNL, 1996
- [23] - DEC / UNL – Fichas de ensaio – Análise de argamassas. Determinação da profundidade de carbonatação. Fe 28. Caparica: FCT / UNL, 1999

- [24] – Disponível em: <http://www.sita.cv/sita/images/stories/documentos/guia_pintura/caiacao.pdf>
Acesso em 15/04/2013
- [25] – DOMINGOS, C. - Caracterização de edifícios Antigos – Edifícios Pré Pombalinos, Dissertação de Mestrado pela FCT-UNL, pág. 83 -85, 2010
- [26] - DULLIEN, F., BATRA V.K. - Determination of the structure of porous media, Progress made in the field of porous media is reviewed and discussed. Flow through porous media symposium, Volume 62, No. 10, October 1970
- [27] – FARIA, M. P. – Argamassas de revestimento para alvenarias antigas – Contribuição para o estudo da influência dos ligantes. Tese de Doutoramento em engenharia civil pela FCT-UNL. Lisboa, 2004
- [28] – FREITAS, V., TORRES, M., GUIMARÃES, A. S. – Humidade Ascensional. FEUP Edições, 1ª edição, 2008
- [29] – GONÇALVES, M. C. – Caracterização química e térmica de materiais. Apontamentos Teóricos. Instituto Superior Técnico, 2010
- [30] – ICOMOS (Comité Científico Internacional para a Análise e Restauro de Estruturas do Património Arquitectónico). Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico, 2003
- [31] - IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry). Disponível em <www.iupac.org>.
- [32] – KULAKOWSKI, M. P. - Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. Tese para obtenção do título de Doutoramento Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002
- [33] – LNEC (Departamento de materiais – Núcleo de materiais metálicos). Caracterização de argamassas da igreja de nossa sr^a da assunção (ELVAS) e do Castelo de Amieira do Tejo (NISA)., Relatório Julho de 2006
- [34] – MARGALHA, M., VEIGA, M., BRITO, J. – Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. 22 e 23 de Novembro 2007
- [35] – MASCARENHAS, J.- Paredes (2ªparte) e Materiais Básicos (1ªparte). Sistemas de Construção, Livros Horizonte, 5ª edição, 2010
- [36] - METZ F., KNOFEL D. - Systematic Mercury porosimetry investigations on sandstones. Materials and Structures, No. 25, pág.127-136, 1992

- [37] – MICROMERITICS. AUTOPORE IV 9500 Series Specifications.
- [38] - MOSQUERA, M. J. et al - Addition of cement to lime based mortars: Effect on pore structure and vapour transport. Cement and Concrete Research, Volume 36, pág.1635-1642.Elsevier, 2005.
- [39] – PAGAIMO, F. – Caracterização Morfológica e Mecânica de Alvenarias Antigas; Caso de Estudo da Vila Histórica de Tentúgal. Dissertação de Mestrado em engenharia civil pela FCT-UC. Coimbra, 2004
- [40] - QUANTACHROME INSTRUMENTS. Mercury Intrusion Porosimetry to Characterize Specialty, Junho 2013
- [41] – RAMACHANDRAN, V.S., PAROLI, R. M., BEAUDOIN, J. J. and DELGADO, A. H. - Handbook of thermal analysis of construction materials. Institute for Research in Construction Ottawa, Ontario, Canada, Noyes Publications – William Andrew Publishing, 2002
- [42] – RATO, V. – Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas. Tese de Doutoramento em engenharia civil pela FCT-UNL. Lisboa, 2006
- [43] – SIMAS, M. - Sistemas de protecção do betão face à carbonatação. Dissertação de Mestrado pelo Instituto Superior Técnico, Novembro de 2007
- [44] – SOLLA, M., GONZÁLEZ-JORGE, H., ÁLVAREZ, M. X., ARIAS, P. – Application of non-destructive geomatic techniques and FDTD modeling to metrical analysis of stone blocks in masonry Wall. Construction and Building Materials, Volume 36, pág. 14-19, 2012